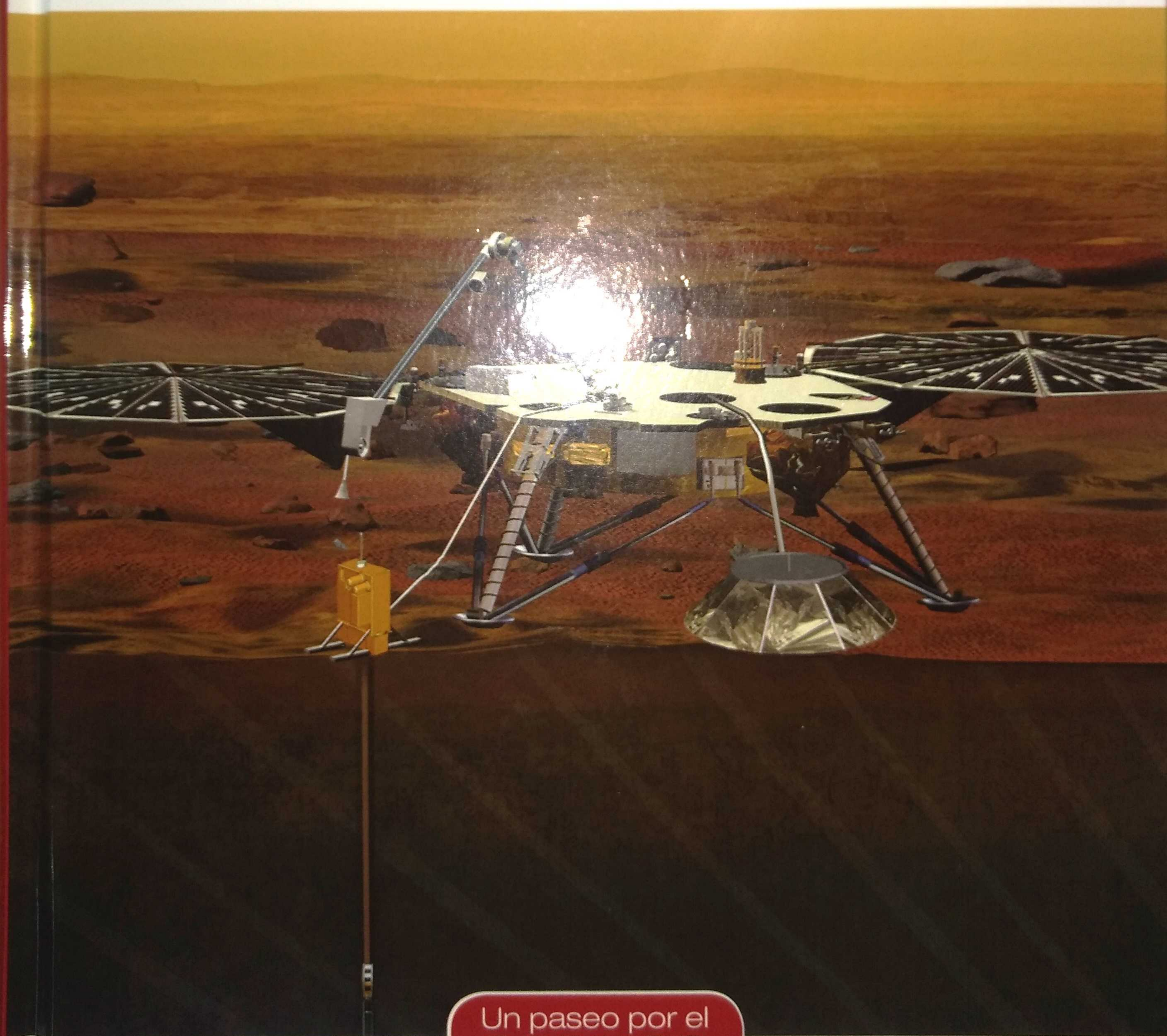


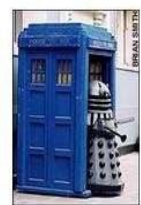
Los robots del futuro

Un reto para la
inteligencia artificial



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigirización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmourey.blogspot.com/>

Los robots del futuro

Un reto para la
inteligencia artificial

RBA

Imagen de cubierta: Recreación del módulo de aterrizaje de la misión InSight trabajando en la superficie de Marte.

*Agradecemos la colaboración de la Secció de Ciències
i Tecnologia de l'Institut d'Estudis Catalans
a la qual pertencen los autores de este volumen.*

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Josep Amat y Alícia Casals por el texto
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.U.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock; 145b; Lionel Allorge; 111a; Biomimetics and Dexterous Manipulation Lab, Stanford University: 64b; Communications Manager: 73b; De Heje: 73a; DLR German Aerospace Center (SpaceJustin): 105i; DooMMeeR: 101ad; dpa: 145a; Eduardo Famendes: 91b; Festo AG & Co. KG: 65a; Getty Images: 107; Humanrobo: 141; iStock: 65b, 75, 101ai, 101b, 111b; JSC/NASA: 105d; Gabriel Lopes/University of Pennsylvania: 64a; NASA/JPL Caltech: portada; NOAA Photo Library/expl1190: 91a; Rama: 17b; Wellcome Images/Wellcome blog post: 17a.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9083-0
Depósito legal: B-16366-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)
Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	La introducción de la automatización 13
CAPÍTULO 2	Concepto y principios de la robótica 41
CAPÍTULO 3	La implantación de la robótica 81
CAPÍTULO 4	Presente y futuro de la robótica 117
LECTURAS RECOMENDADAS	153
ÍNDICE	155

INTRODUCCIÓN

El progreso de la humanidad ha sido posible gracias a la capacidad de nuestra especie para construir herramientas. Las denominaciones de Edad de Piedra y Edad de los Metales revelan claramente el tipo de herramientas primitivamente desarrolladas. Estos primeros utensilios contruidos a partir de piedra, madera o hueso tenían por objetivo aumentar la eficiencia tanto en la caza como en la agricultura.

No fue hasta la Edad del Cobre, hacia el año 9500 a.C., que comenzó a extenderse desde Anatolia la fusión y obtención del metal a partir de las cupritas o las calcopiritas, lo que aumentó sustancialmente la capacidad de producir nuevos útiles y herramientas más eficaces. Esta tecnología tardó casi tres mil años en llegar a producir instrumentos de uso habitual que se caracterizaban por la poca dureza del cobre. Tuvieron que pasar cinco mil años para que la humanidad encontrase una técnica para conseguir aumentar su dureza. Ello se consiguió con la aleación de este metal con estaño, para producir el bronce, un avance tecnológico que marca el inicio de la Edad del Bronce.

Estos lentos progresos tecnológicos, vistos desde la perspectiva actual, propiciaron un salto muy significativo: la aparición

de la rueda entre el año 3500 y el 3100 a.C., considerada una de las invenciones más importantes de la humanidad.

Unos dos mil años más tarde aparecieron ya los molinos de molienda, tanto los de tracción animal como los movidos por agua, que constituyen una de las primeras máquinas construidas por el ser humano. Su uso, tanto de los molinos de viento como de las norias hidráulicas destinadas a producción de energía motriz, no se generalizó hasta entrada la Edad Media.

A mediados del siglo xvii se produjo un avance significativo en el desarrollo tecnológico: la invención de la máquina de vapor. Los primeros desarrollos aparecieron ya en la primera década del siglo, pero no fue hasta 1698 que Thomas Savery patentó una primera máquina de vapor realmente práctica para su aplicación industrial. Más tarde, en 1788, James Watt inventó el regulador centrífugo, un regulador mecánico que permitía estabilizar la velocidad de rotación de las máquinas de vapor y, por tanto, poder utilizarlas con fiabilidad y eficacia para impulsar todo tipo de maquinaria. La generalización del uso de la máquina de vapor permitió disponer de energía independientemente de la presencia o no del viento o de la disponibilidad de agua, y fue la base de la denominada Primera Revolución Industrial, que surgió en el sur de Inglaterra y que se extendió muy rápidamente por el centro de Europa.

A lo largo de los siglos xviii y xix se consiguió que unos primeros conocimientos sobre los efectos de la electricidad comenzasen a estudiarse científicamente. En particular, cabe destacar los trabajos de Benjamin Franklin, que realizó los primeros estudios sobre la naturaleza de la electricidad, Luigi Galvani, que descubrió y estudió la existencia de la bioelectricidad, y Alessandro Volta, que consiguió la generación de electricidad químicamente. Michael Faraday estudió el campo electromagnético y desarrolló el primer motor eléctrico, mientras que los trabajos de James C. Maxwell y Heinrich Hertz sobre el electromagnetismo y la propagación radioeléctrica, respectivamente, dieron lugar a la invención de la radio. Este logro abrió el campo de la comunicación mediante ondas electromagnéticas.

Gracias a estos nuevos conocimientos, en 1866 se comenzaron a desarrollar las primeras dinamos, que permitieron por primera vez disponer de electricidad como un recurso energético. Esta innovación propició el inicio de la electrificación, al principio en corriente continua y posteriormente en corriente alterna. Esta permite el cambio de tensión mediante transformadores, facilitando así el transporte y la distribución de la electricidad. En esta nueva etapa de desarrollo de la tecnología eléctrica destacó Thomas A. Edison, un prolífico inventor y empresario que desarrolló un gran número de patentes tanto sobre las máquinas de producción de energía eléctrica como de otros dispositivos relacionados con la electricidad: la batería recargable, la iluminación (la bombilla eléctrica), la telefonía o el fonógrafo, entre otros.

Con la introducción de la electricidad se inició la aceleración del progreso tecnológico de la humanidad, que a su vez impulsó los avances en el conocimiento científico. Por este motivo resulta apropiado referirse a este progreso como a un progreso técnico-científico, que, como se ha visto, se había producido hasta entonces a un ritmo mucho más lento. A partir de ese momento no dejan de sucederse nuevos hitos en cortos intervalos de tiempo, tales como el desarrollo de la electrónica o invenciones tan relevantes como el sonar (1915), la televisión (1920), el microscopio electrónico (1926), el radar (1935), el computador electrónico ENIAC (1946), el láser (1960) o el GPS (1960). Esta evolución tecnológica no solo no ha parado de producirse hasta el presente, sino que además lo ha hecho a un ritmo cada vez más acelerado, y así seguirá siendo en el futuro.

En las últimas décadas, además de las herramientas físicas también se han desarrollado herramientas inmateriales, como la informática, entendida como el contenido volátil (*software*) del computador. La robótica es un nuevo instrumento de trabajo, surgido a mediados del siglo xx, que combina ambos tipos de herramientas, pero no es un invento revolucionario surgido de la mente de un ingeniero con el objetivo de ofrecer la posibilidad de realizar procesos industriales sin tener que recurrir a operadores humanos. La robótica representa una culminación de la confluencia del progreso de un conjunto de tecnologías.

La robótica constituye una ciencia y una tecnología. Como ciencia, la robótica no solamente combina conocimientos de física, electrónica, cálculo algebraico e informática, sino que también constituye una plataforma para el desarrollo de la teoría de control, la cinemática, el tratamiento de imágenes y la inteligencia artificial. Como tecnología, el desarrollo de la robótica se apoya sobre un espectro muy amplio de disciplinas, desde la mecánica, la microelectrónica, los microprocesadores, las nanotecnologías y la informática gráfica, hasta la visión por computador o el reconocimiento de voz.

El objetivo de este libro es proporcionar al lector unas bases sobre las que pueda contemplar y comprender la robótica desde el punto de vista de sus fundamentos teóricos y, si lo desea, poder profundizar en los conocimientos básicos que aquí se esbozan. Con esta visión de la robótica desde una perspectiva formal, fundamentada en unos principios físicos y teóricos básicos, se ofrecen al lector unos elementos que le permitan valorar los progresos conseguidos hasta hoy, así como identificar las limitaciones que la tecnología actual impone en el campo de la robótica, y poder entender e intuir con más base los progresos que pueden esperarse en los próximos años en este ámbito.

El libro presenta los elementos constitutivos de los robots y las características básicas que permiten su clasificación, así como la valoración de su idoneidad para poder realizar una determinada tarea. Asimismo, se describen las principales aplicaciones de la robótica y las exigencias que comporta cada campo de aplicación. Capítulo aparte merece el estudio de los robots móviles y sus diferentes formas de adquirir movilidad, tanto en el entorno terrestre como en el marino y en el aéreo, y la aplicación de la inteligencia artificial a la robótica, una capacidad que ha hecho posible penetrar en el vasto campo de los robots de servicios. Dentro de él, se trata con especial atención la robótica aplicada a la medicina, un campo aún incipiente que en los próximos años experimentará un gran crecimiento.

Finalmente, se aportan unas reflexiones sobre el impacto social y económico que comporta la introducción de la robótica, tanto en lo que hace referencia al aspecto laboral como en la

brecha tecnológica entre regiones y países. También se consideran los efectos de la robotización en los próximos años en cuestiones como la calidad de vida y la dependencia tecnológica, y se valora el impacto que puede provocar la robótica en los próximos años, cuando su implantación sea mucho más generalizada e intensiva.

La introducción de la automatización

La introducción de la electrónica y la informática en la industria permitió aplicar las teorías sobre el control y la cibernética en los procesos productivos. La automatización se inició con la transistorización de los sistemas analógicos de control, y más tarde se generalizó con el desarrollo de los sistemas digitales, en especial de los microprocesadores.

En la mayor parte de los casos, el objetivo de la robótica es realizar tareas ya sea con mayor calidad o que resultan imposibles de llevar a cabo por personas debido a sus características.

La robótica es fruto de un proceso evolutivo de la tecnología, que eclosionó en el siglo xx pero cuyos antecedentes se remontan hasta el siglo iv a.C., con el desarrollo de los primeros autómatas. Estos autómatas eran unos mecanismos que imitaban ciertos movimientos de personas o animales. Una de las primeras referencias conocidas de una representación humana mecanizada se encuentra en el *Liezi*, un texto clásico del taoísmo, donde se describe una demostración hecha al rey Mu de Zhou (1023-957 a.C.) en la que el autómata va cambiando de postura y efectúa ciertos movimientos mientras canta.

En la cultura helenística también existen múltiples referencias de autómatas movidos por corrientes de agua. Estos autómatas hidráulicos estaban orientados a conseguir el movimiento y producir música mediante tubos de órgano. Para ello se debía realizar una captación de agua, pero procurando que también se produjera una entrada de aire, de forma que el agua, en su descenso por el tubo de alimentación de una cámara eólica, va compri-

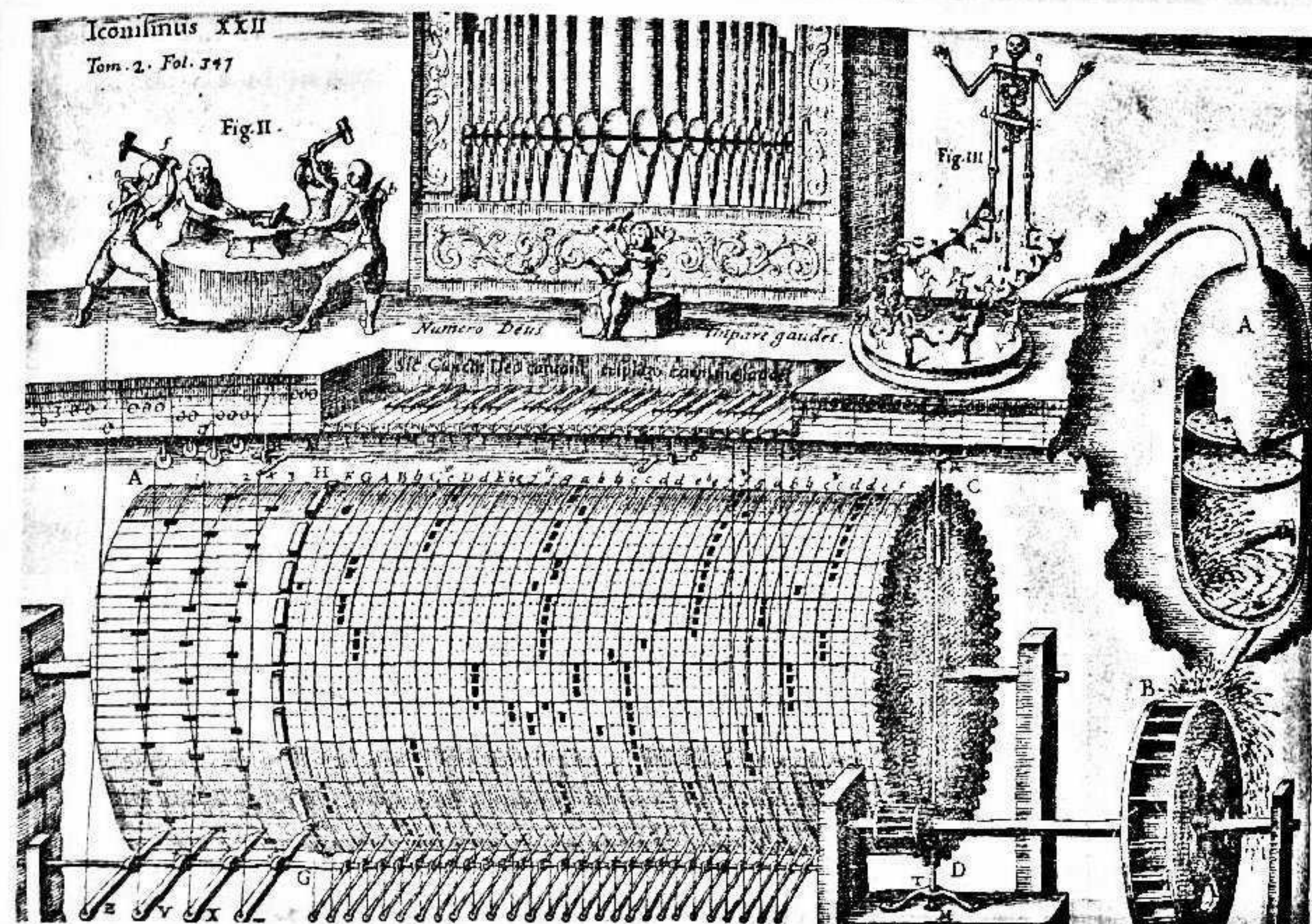
miendo el aire arrastrado. En la parte superior de esta cámara se dispone una salida para la alimentación de los tubos del órgano. El movimiento del autómeta y de los mecanismos que permiten la entrada de aire en los tubos proviene de una rueda hidráulica movida por la salida del agua de la parte inferior de la cámara eólica, como se aprecia en la imagen superior de la página contigua. El movimiento estaba basado en dispositivos mecánicos que permiten la ejecución de los movimientos preprogramados.

El empeño por desarrollar estructuras con apariencia humana dotadas de movimiento propio para aplicaciones ornamentales o lúdicas culminó a finales del siglo XIX y principios del XX. Construidos en prestigiosos talleres de relojería de Francia, Alemania o Suiza, estos autómetas contaban con sofisticados mecanismos que conseguían mover los brazos, las manos, las piernas e incluso los ojos y la boca de los personajes representados (véanse las fotografías inferiores de la página contigua).

La capacidad de desarrollar mecanismos más complejos y precisos para efectuar movimientos preprogramados no permite por sí sola implementar el otro anhelo de la humanidad, el de poder disponer de robots como brazos ejecutores a su servicio. Para conseguir el nivel de autonomía suficiente para alcanzar este objetivo es necesario disponer de la capacidad de programación de la tarea que se desea realizar, de manera que el robot pueda adaptarse al entorno de trabajo. Este nivel de programación no fue posible hasta la aparición de la electrónica ya en el siglo XX, que permitió implementar las estrategias de control adecuadas.

LA TEORÍA DE CONTROL

La necesidad de estabilizar de forma automática la velocidad de rotación de los molinos de viento obligó a desarrollar unos elementos reguladores que permitieran variar la orientación del molino con el viento, o regular el ángulo de las palas en función de su velocidad de rotación. La solución consistente en disponer unos péndulos que se separan por la fuerza centrífuga cuando están en rotación, fue popularizada como «el regulador de Watt»,



Arriba, un grabado de 1650 de Athanasius Kircher, que muestra el funcionamiento de un órgano hidráulico con autómetas. En las fotografías inferiores, tres autómetas construidos en el taller del relojero Pierre Jaquet-Droz y presentados en 1774: la pianista y el dibujante (izquierda) y el escritor (derecha).

al haberla adoptado el célebre ingeniero e inventor James Watt a finales del siglo XVIII, para gobernar la válvula de entrada del vapor y estabilizar la velocidad de las máquinas de vapor. Este dispositivo se considera el primer mecanismo que permite la regulación automática de un proceso, en este caso el de mantener más constante la velocidad de rotación de una instalación motriz

basada en la máquina de vapor, frente a las variaciones de carga.

El control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia.

KATSUHIKO OGATA

surgió la necesidad de controlar la velocidad de rotación de los alternadores para producir corriente eléctrica a 50 o a 60 Hz, o la posición de los alerones de los aviones para conseguir su estabilidad en vuelo, o la necesidad de mantener de forma automática la velocidad de un automóvil, o de regular la temperatura en la calefacción doméstica, o la temperatura, la presión o el caudal en procesos químicos.

Analizando uno cualquiera de estos sistemas, constatamos que está constituido por un *controlador* y un *actuador*. En el caso de la calefacción, por ejemplo, el controlador sería la espita del gas del quemador, el actuador, la caldera de combustión, y la temperatura sería la variable que se quiere controlar.

En esta estructura de control, conocida como *control en anillo abierto* (figura 1, arriba), se introduce la consigna que se cree más oportuna para que el controlador consiga a través del actuador el resultado esperado, por ejemplo, controlar una temperatura, una presión, una velocidad, un caudal o un nivel. Pero esta estrategia no logra que la salida se mantenga constante cuando varían las condiciones del entorno. Por ejemplo, si la variable que se pretende controlar es la velocidad de un vehículo a través del acelerador y viene un tramo en subida, al mantener la consigna inalterada (la posición del acelerador), la velocidad del automóvil disminuirá. Por el contrario, manteniendo constante la consigna, la velocidad aumentará al llegar a un tramo en bajada.

EL REGULADOR DE WATT

El regulador de Watt es un tipo de regulador centrífugo desarrollado en 1788 por James Watt con el objetivo de controlar la velocidad de las máquinas de vapor. Este regulador se considera el primer servomecanismo (mecanismo que dispone de realimentación) diseñado para la regulación automática de un proceso y fue utilizado hasta mediados del siglo XX como regulador o limitador de velocidad en máquinas rotatorias, ascensores, etc.

La fuerza centrífuga como freno

El aparato consiste en un paralelogramo articulado que se halla suspendido sobre un eje conectado al eje de rotación de la máquina. En los lados superiores del paralelogramo (brazos) se disponen unos pesos (esferas) que, por gravedad, quedan «colgando» cerca del eje cuando el sistema está en reposo, como se muestra en la parte izquierda de la figura. Con la rotación del eje, la fuerza centrífuga generada provoca un alejamiento de las esferas, lo que se traduce en la elevación de los brazos, como representa el esquema de la derecha. Dado que la fuerza centrífuga es proporcional a la velocidad de rotación, el movimiento del vástago sujeto a la base del paralelogramo constituye a la vez un instrumento de medición de la velocidad y un actuador capaz de controlarla.

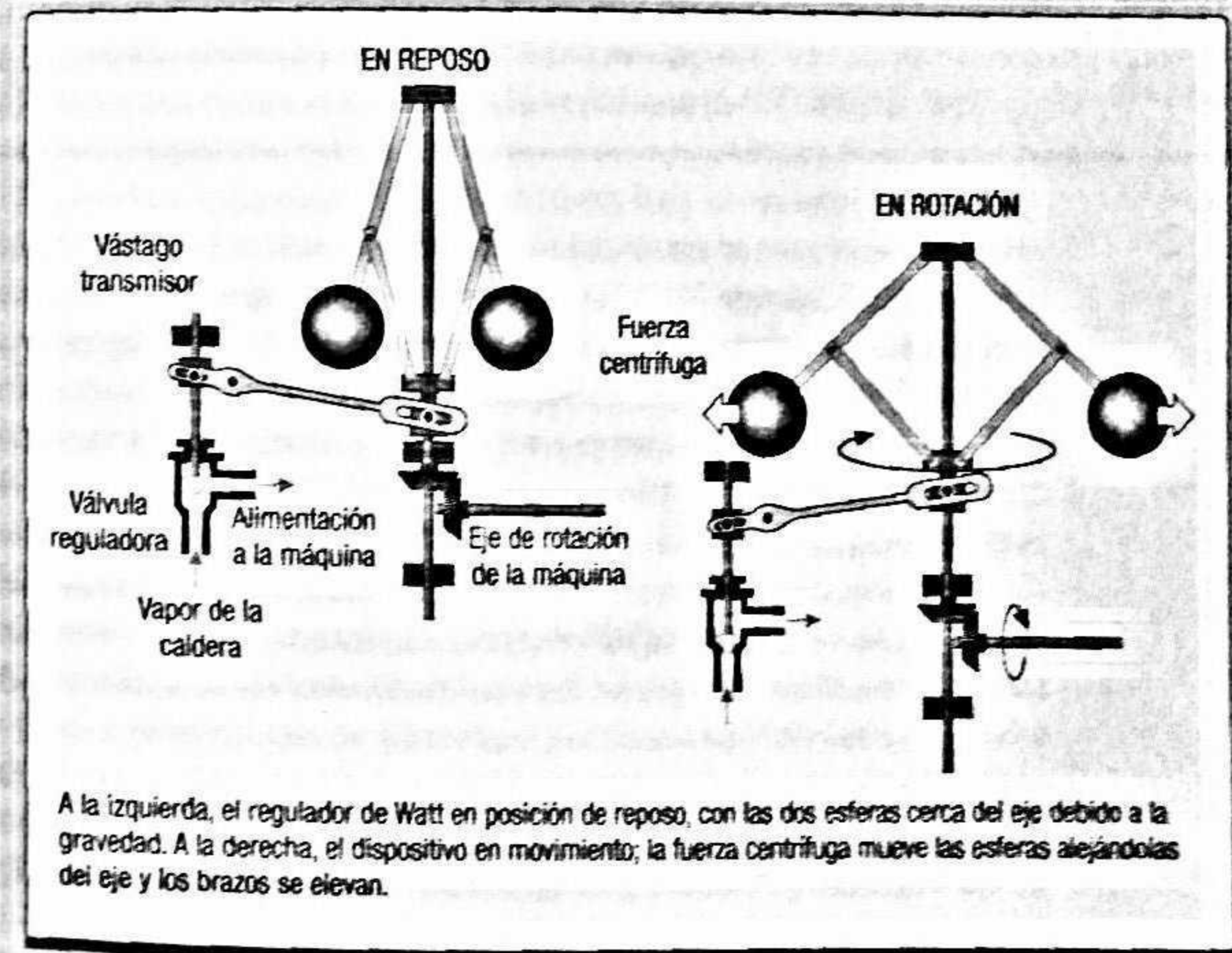
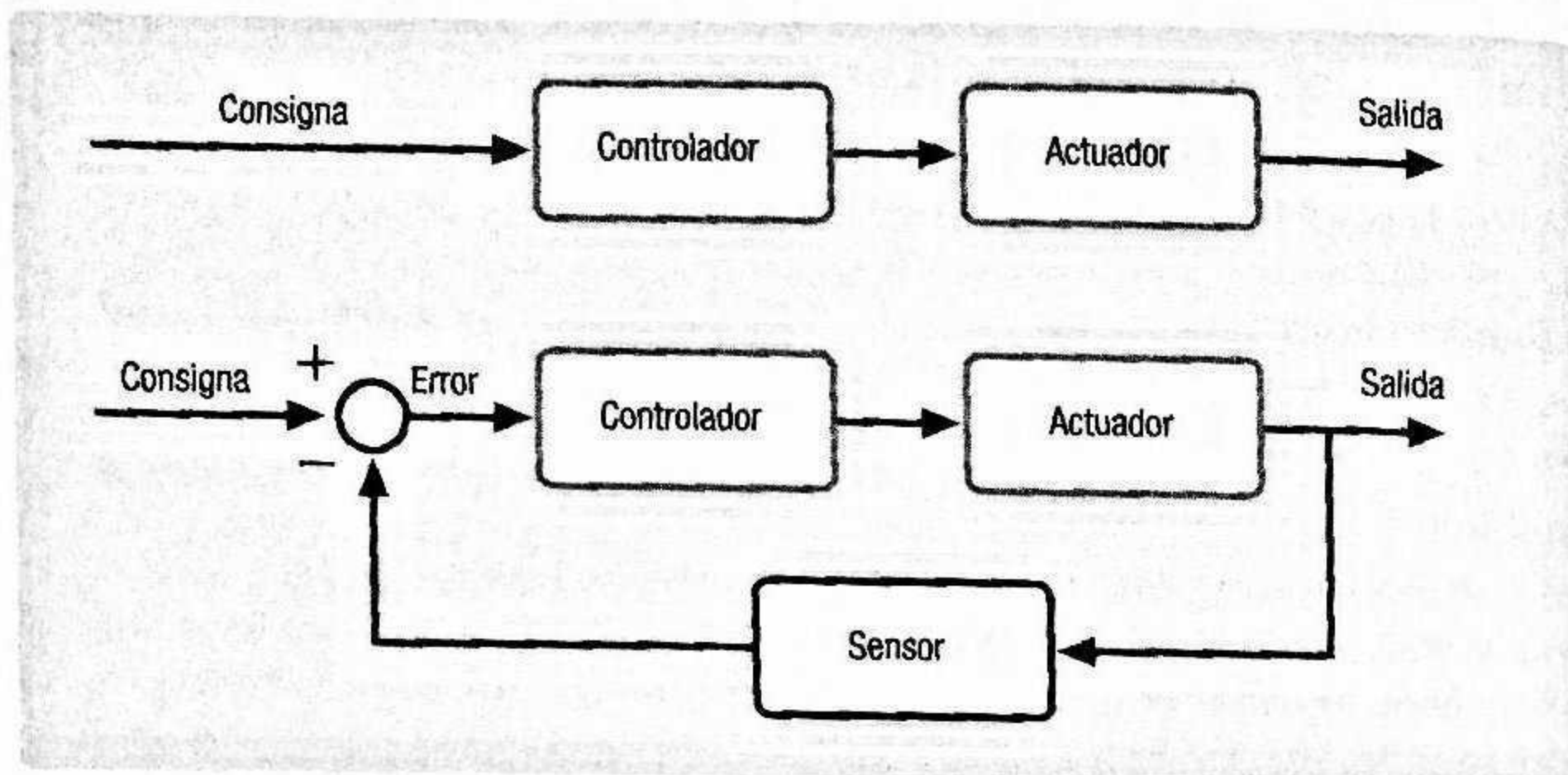


FIG. 1



Arriba, esquema de un sistema de control en anillo abierto, cuya salida responde a una orden de entrada dada y no resulta corregida si se producen perturbaciones externas. Debajo, un sistema de control en anillo cerrado, cuya salida responde a la diferencia entre la consigna dada y la salida obtenida. De esta forma se consigue corregir las posibles perturbaciones externas.

Para mantener la estabilidad de las variables de salida aunque cambien las condiciones del entorno, hay que adaptar continuamente la entrada del actuador para conseguir adaptarse a las condiciones variables de operación. Para ello es necesario disponer de un sensor que permita medir el valor de la variable de salida y actuar no en función de la consigna, sino en función de la diferencia entre la consigna deseada y la salida real obtenida, diferencia que corresponde al error del sistema de regulación. En este caso la estrategia de control es la indicada en el esquema inferior de la figura 1, que se denomina *control en anillo cerrado* o *control con realimentación (feedback)*.

Con la estrategia de control en anillo cerrado, el controlador está diseñado para que su salida sea la que consigue que el valor de su entrada (el error) sea lo más reducido posible. De esta forma la salida del controlador al actuador ya no permanecerá constante frente a una consigna dada, sino que se adaptará para

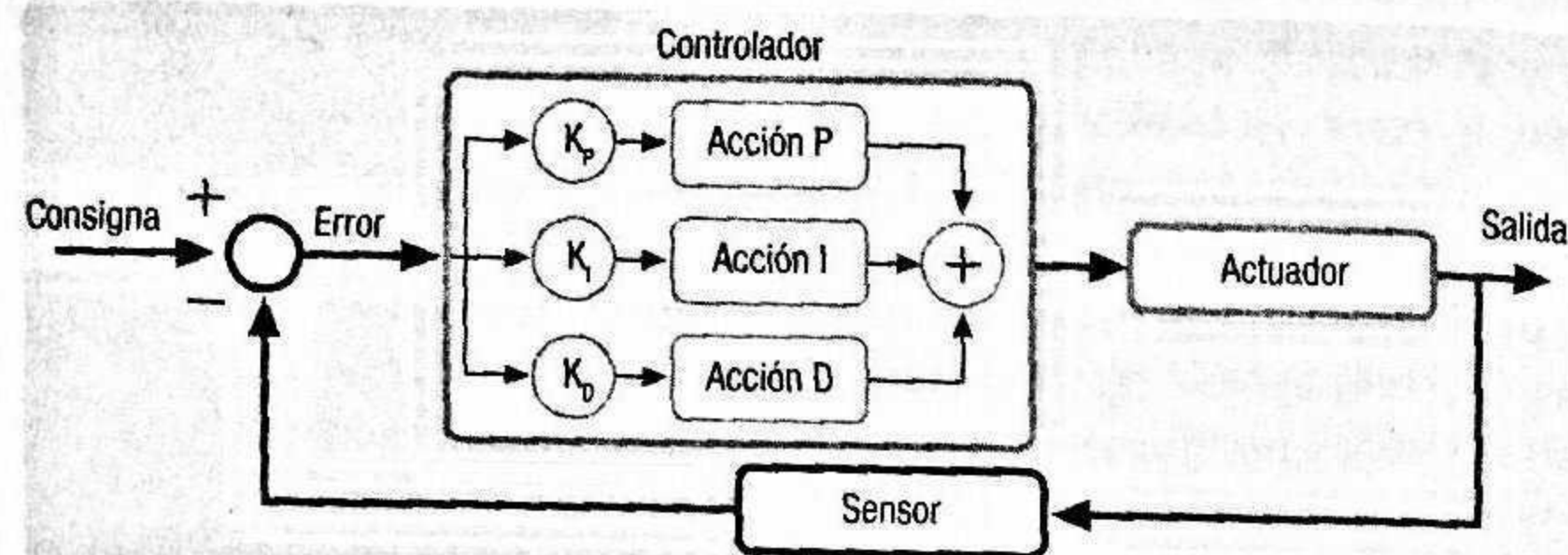
que la salida del actuador siga a la consigna, compensando así las perturbaciones que puedan producirse. Ello se consigue al efectuar la resta de la salida real con la consigna. La señal resultante, el error, es la entrada del controlador. El controlador puede ser un simple amplificador, ya que cualquier variación de la salida, por pequeña que sea, modifica la señal de error resultante, produciendo una significativa variación de la actuación que tiende a compensar esta variación de salida. Si el valor de la ganancia de este amplificador es muy elevado, un pequeño error puede producir una excesiva variación de la actuación, con la consiguiente inestabilidad del sistema.

La teoría de control se desarrolló para dar respuesta al triple reto que se plantea en todo sistema de control: conseguir la mayor precisión posible con el mínimo tiempo de respuesta y con estabilidad. La estrategia más común utilizada para conseguir el mejor compromiso entre estos tres aspectos, que generalmente resultan incompatibles, es la conocida con la sigla PID. Se trata de una estrategia de control compuesta por tres componentes, que de forma conjunta generan la señal que gobierna el actuador, como se muestra en la figura 2.

De hecho, esta estrategia basada en tres conceptos es muy similar a la que mentalmente realizamos cuando pretendemos controlar de forma manual una variable física, como el nivel de un líquido en un recipiente disponiendo de un grifo de llenado. Al principio, valoramos la cantidad de líquido necesario para proceder al llenado, y abriremos más o menos el grifo en función de la cantidad que tengamos que llenar (error). Se trata del primer componente del control, la estrategia P de proporcionalidad. Cuando se trata de hacer una tarea de regulación manual, nuestra actuación suele ser muy proporcional. Efectuar este llenado con un criterio únicamente proporcional lleva a que se vaya cerrando el grifo a medida que se alcanza el nivel deseado de llenado, dado que la actuación es proporcional al error, y este error ya se va reduciendo. Ello implica la progresiva disminución en la velocidad de llenado, lo que hace alargar el tiempo de respuesta.

Así pues, se hace necesario introducir un segundo tipo de acción, el componente I, que se establece para compensar esta di-

FIG. 2



Esquema de un sistema de control en anillo cerrado, en que el controlador está basado en la suma de tres factores, un factor proporcional P, un factor integral I y un factor derivativo D.

latación del tiempo de llenado y consiste en añadir una acción adicional que es proporcional al error y al tiempo en que se mantiene este error. Este producto realizado de forma continuada entre el error y el tiempo, matemáticamente corresponde al concepto de integral de la función error, una función que también realizamos de forma intuitiva al impacientarnos, sin aperecernos de que en nuestro interior estamos integrando el error respecto al tiempo. Esta corrección, I, nos lleva a abrir más el grifo aunque el error sea reducido, si apreciamos que este error tiende a mantenerse con el tiempo.

Al efectuar también de forma manual una acción de regulación, aún realizamos en la mente una tercera acción correctiva: si al producirse el llenado, por las causas que sean, el líquido sube bruscamente amenazando con sobrepasar el nivel previsto, reaccionamos de forma intuitiva ante este aumento de velocidad cerrando más el grifo. En términos matemáticos esta acción correspondería a una acción derivativa (componente D) que actuaría en sentido contrario al de la velocidad de variación del error con el tiempo.

Un sistema automático de control con una estrategia PID óptima conjuga la acción de los tres componentes, proporcional, integral y derivativo, mediante los tres factores de ponderación K_p , K_i y K_d (figura 2). Este tipo de control permite optimizar la

consecución del mínimo error posible con el menor tiempo de respuesta y sin oscilaciones. Fue precisamente este tercer aspecto, el de conseguir la estabilidad de los sistemas realimentados, el que durante la segunda mitad del siglo XX mereció un especial interés y motivó el estudio de criterios y condiciones de estabilidad en los sistemas de control.

Dado que estos tres factores de ponderación pueden tener que actualizarse según las variaciones de las condiciones del entorno, los sistemas avanzados de control optimizan de forma continua la configuración del controlador y sus parámetros. De esta manera se logra el comportamiento óptimo del controlador en cualquier circunstancia de trabajo. El desarrollo de la microelectrónica y la microinformática han permitido generalizar la incorporación de estrategias inteligentes de control y sistemas de aprendizaje, de forma que actualmente los controladores consiguen comportamientos muy satisfactorios para todo tipo de aplicaciones, especialmente en el campo de la robótica.

Esta estrategia del control realimentado o *feedback* fue muy estudiada a mediados del siglo XX, observándose que en realidad también es la estrategia con que operan los seres vivos para mantener sus constantes. Ello se consigue disponiendo también de biomateriales sensibles a estos distintos parámetros, que actúan como sensores. De ahí surgió el concepto más general de cibernética, del término griego κυβερνήτης (*kybernetes*), que significa «timonel» o «piloto». Este concepto se consolidó con la publicación en 1948 de la obra *Cibernética* de Norbert Wiener, que llevó a extender la teoría de control también al campo de la economía y de muchos otros aspectos sociales.

En los aspectos macroeconómicos, el control de los principales parámetros que reflejan nuestra economía, como pueden ser el índice de crecimiento del PIB, la inflación o el paro, también se tratan —con más o menos éxito— aplicando las teorías de control. Para ello se actúa sobre determinadas variables de con-

La cibernética procura hallar los elementos comunes al funcionamiento de las máquinas automáticas y al sistema nervioso del ser humano.

NORBERT WIENER

trol, como el tipo de interés o los aspectos fiscales. Esta teoría es igualmente aplicable a la economía de la empresa, desde el control de la producción y gestión de *stocks* hasta la gestión de la publicidad. En los aspectos más sociales, cada vez adquiere mayor importancia la interpretación de las encuestas de opinión pública como procedimiento de medición del impacto para implementar estrategias basadas en la realimentación.

En medicina también se aplica la teoría de control, aunque en menor medida, para la prescripción de medicamentos convencionales. Para ello se efectúa el seguimiento de los resultados para corregir la prescripción inicial. Estas teorías de control se aplican en mayor medida en tratamientos especiales individualizados, y particularmente en aplicaciones más exigentes, como es el caso de los controladores de los útiles implantados (marcapasos, dosificadores de insulina, electroestimuladores, etc.).

Sistemas analógicos y sistemas digitales

La teoría de control se basa en poder disponer de un sensor apropiado que permita proporcionar el estado real de la variable controlada y, a partir de una consigna, generar la salida para el control del proceso. En el caso del control de la temperatura, disponiendo de un termorresistor, el controlador genera una variable de salida, que puede ser una tensión de 0 a 10 V que a través de un dispositivo de control de potencia proporcione al sistema los vatios de calefacción o el caudal del gas de un quemador. El sensor de temperatura que se precisa varía el valor de una resistencia, una corriente o proporciona una tensión, que modifica su valor de forma análoga a la temperatura que se mide. Por eso los sistemas que operan con señales eléctricas cuyos valores son análogos al valor de las variables que se controlan, se denominan sistemas analógicos.

Otra forma de proceder consiste en operar con señales cuyo valor no varía entre unos límites superior e inferior, sino que cada señal utilizada solo posee los dos estados extremos, los estados de un sistema binario (0 y 1) que corresponden a situaciones como presencia/no presencia, correcto/falso, abierto/cerra-

do o paro/marcha. Con estas variables lógicas binarias pueden implementarse dispositivos lógicos, y también sistemas con capacidad de cálculo, expresando las variables mediante un conjunto de estados binarios. Los sistemas que operan con estados binarios se conocen como sistemas digitales.

Del mismo modo que con múltiples elementos de un dígito (10 estados) pueden expresarse variables de muchos dígitos, con múltiples elementos con solo dos estados (un bit), también es posible expresar variables de amplio rango. La forma más habitual de operar con magnitudes analógicas mediante sistemas digitales es mediante el código binario. En la tabla siguiente se muestra cómo un valor, en este caso del 0 al 15, puede expresarse en código binario mediante bits. Obsérvese que para obtener el valor decimal correspondiente a un número binario, basta con sumar los pesos de cada bit, que de derecha a izquierda corresponden a los valores 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64...

Equivalencia del sistema binario y el sistema decimal	
Valor	Código binario
0	00000
1	00001
2	00010
3	00011
4	00100
5	00101
6	00110
7	00111
8	01000
9	01001
10	01010
11	01011
12	01100
13	01101
14	01110
15	01111

Los sistemas digitales precisan sustituir cada amplificador que procesa una señal analógica por un conjunto de amplificadores correspondientes a cada uno de los bits que constituyen las magnitudes que se desea procesar. Este aumento de complejidad que supone el tener que sustituir un amplificador por un conjunto de amplificadores —aunque estos sean de menores prestaciones, dado que solo deben poseer dos estados, el de conducción y el de no conducción— fue posible, en primer lugar, con la introducción del transistor, y después con el desarrollo de la integración a gran escala, gracias al continuo progreso de la microelectrónica.

LA MICROELECTRÓNICA

Todo el progreso de la tecnología, del que la robótica ha sido un elemento muy destacado, ha sido posible gracias al desarrollo de la microelectrónica. Hasta mediados del siglo xx, la electrónica ya alcanzó hitos muy relevantes, como la radio, la televisión o el registro y reproducción del sonido. En aquella época, el componente básico de toda la electrónica era la válvula de vacío, un elemento amplificador basado en la *conducción termoiónica*, que requiere operar con una ampolla al vacío y un calefactor para producir la emisión de electrones. La corriente de conducción puede producirse al variar un campo eléctrico aplicado a unas rejillas interpuestas para el control del flujo de electrones. Ello produce el efecto amplificación o la conmutación. Este componente, patentado por el inventor Thomas A. Edison en 1884, comenzó a utilizarse como amplificador electrónico a finales del siglo xix y su uso se extendió durante la primera mitad del siglo xx, pero a pesar de sucesivos perfeccionamientos y reducciones de volumen, su empleo quedaba siempre muy limitado.

A principios de la década de 1950 se produjo un avance muy significativo: la aparición del transistor. Este nuevo componente amplificador no se basaba ya en el efecto termoiónico, sino en el efecto semiconductor del germanio o del silicio.

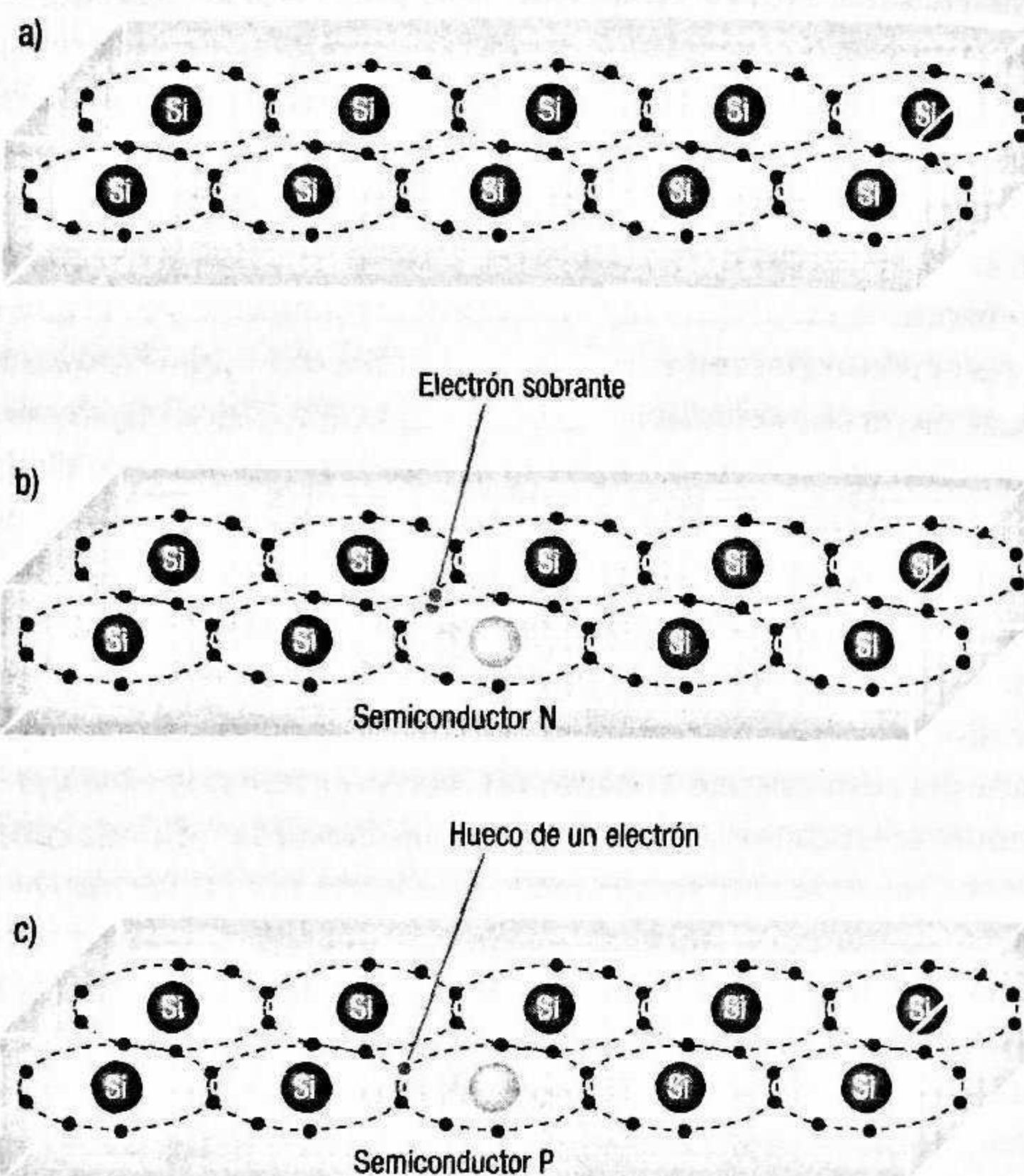
En los semiconductores cristalinos puros, la resistividad puede variar desde unos 100Ω o menos (estado de conducción) hasta

más de $10^{12} \Omega$, esto es, un uno seguido de doce ceros (estado de no conducción), según la presencia o no en la estructura cristalina de trazas de un contaminante. Ello es debido a que en los cristales de germanio o silicio, que son átomos tetravalentes, los cuatro electrones de la última capa de cada átomo son compartidos por los cuatro átomos vecinos, formando estructuras muy estables de ocho electrones en la última capa, cuatro propios y cuatro compartidos (imagen a) de la figura 3). Este es el motivo por el que este tipo de cristales tienen una conductividad tan baja. Para aumentarla, se inyectan selectivamente en esta estructura impurezas de algún elemento trivalente o pentavalente, en un horno de difusión a altas temperaturas. De esta forma las impurezas se integran en la red cristalina, en la que aparecen átomos con un electrón de menos, o de más, según el contaminante introducido. Estos nuevos átomos compartirán sus electrones con los átomos vecinos en la red cristalina. Ello producirá una movilidad de electrones, que en el caso del contaminante trivalente van cubriendo los huecos presentes en la estructura cristalina y en su movilidad dejarán nuevos huecos, que serán cubiertos sucesivamente por otros electrones.

Si en el material semiconductor se ha inyectado un contaminante pentavalente, este introduce los electrones sobrantes de los cuatro que pueden compartirse con los átomos vecinos en la última capa de la estructura del cristal. Este material se denomina *material de tipo N* (imagen b) de la figura 3) y produce movilidad de electrones en el cristal, lo que conlleva una alta conductividad. Igualmente, si se ha inyectado impurezas de material trivalente, con huecos en la estructura de la última capa de los electrones, se denomina *material de tipo P* (imagen c) de la figura 3), y adquiere también de esta forma una alta conductividad.

Mediante los semiconductores se experimentó el fenómeno de la conducción unidireccional, una propiedad que no presentan los metales, ya que su conductividad no depende del sentido del paso de la corriente. En cambio, ensayando en los semiconductores no resulta así. Si se ensaya una unión PN, constituida por cristales de germanio o de silicio en los que se haya inyectado impurezas trivalentes en una parte del cristal y pentavalentes

FIG. 3



Estructura de un cristal de silicio normal (a); de silicio N (b), que contiene impurezas pentavalentes (arsenio), y de silicio P (c), que contiene impurezas trivalentes (boro).

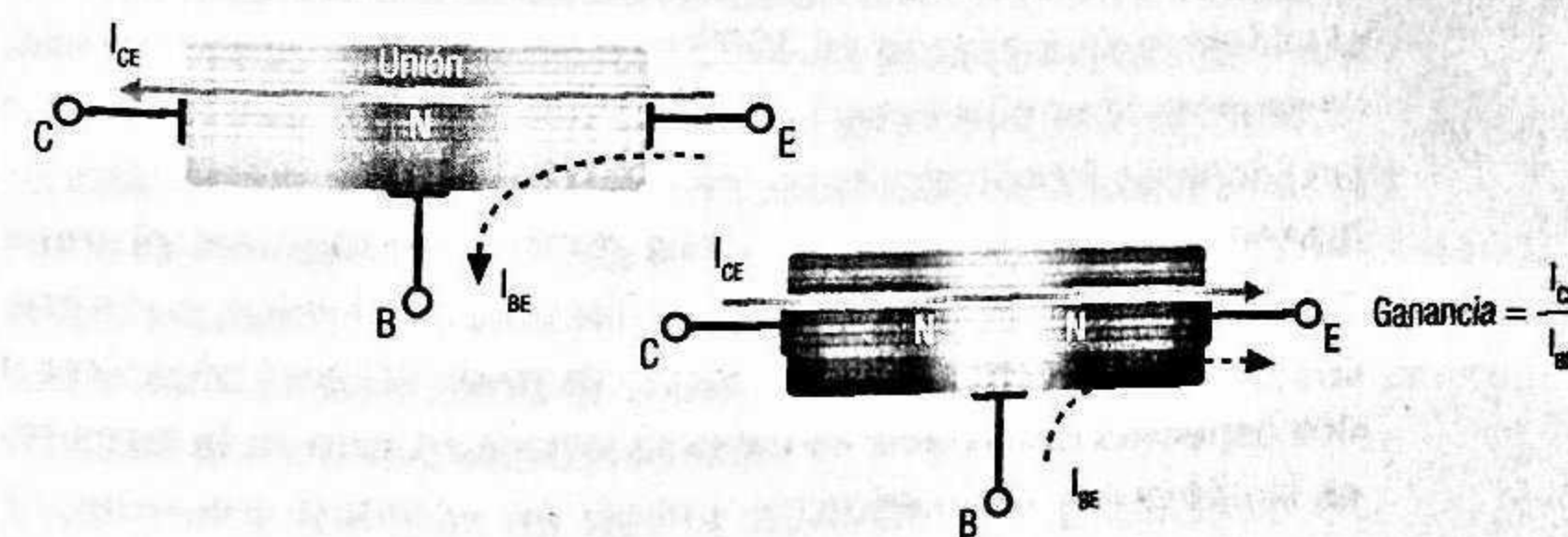
en la otra, el resultado es que se produce la conducción en el sentido PN y no en sentido inverso NP (efecto diodo).

Puesto que tanto el efecto diodo como el de amplificación se conseguían mediante las válvulas de vacío, surgió el interés por conseguir también el efecto amplificador mediante los semiconductores. Esto se logró por primera en 1947 por parte de los físicos de los Laboratorios Bell, John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley, al emparejar en un mismo cristal dos uniones diodo PN

enfrentadas, formando una estructura PNP (figura 4, izquierda). Esta estructura, en principio, no podría presentar la conducción entre extremos, de colector (C) a emisor (E), ni en uno u otro sentido. Pero introduciendo un tercer electrodo, la base (B), para inyectar una pequeña corriente de entrada (I_{BE}) en la unión central, se logró una conducción proporcional a la entrada entre los extremos CE. Al ser esta corriente de salida muy superior a la de entrada, se produce el efecto amplificador mediante una nueva tecnología con un componente de dimensiones mucho menores que las válvulas electrónicas utilizadas hasta entonces, sin necesidad de un filamento calefactor y con un proceso de fabricación que resulta mucho menos costoso. La invención del transistor bipolar (con dos uniones) mereció a los tres investigadores el Premio Nobel de Física en 1956, y se considera que es la creación tecnológica más relevante del siglo xx. Tras la invención del transistor bipolar de germanio y de tipo PNP, se desarrolló la tecnología de silicio con estructuras NPN (figura 4, derecha), que mejoran sus características, tanto la estabilidad térmica como el factor de amplificación.

El verdadero progreso aportado por los transistores fue el desarrollo, pocos años más tarde, de la microelectrónica, que se produjo con la implementación de los circuitos integrados. El proceso de fabricación de circuitos integrados se desarrolló a partir de las tecnologías fotolitográficas de fabricación del tran-

FIG. 4



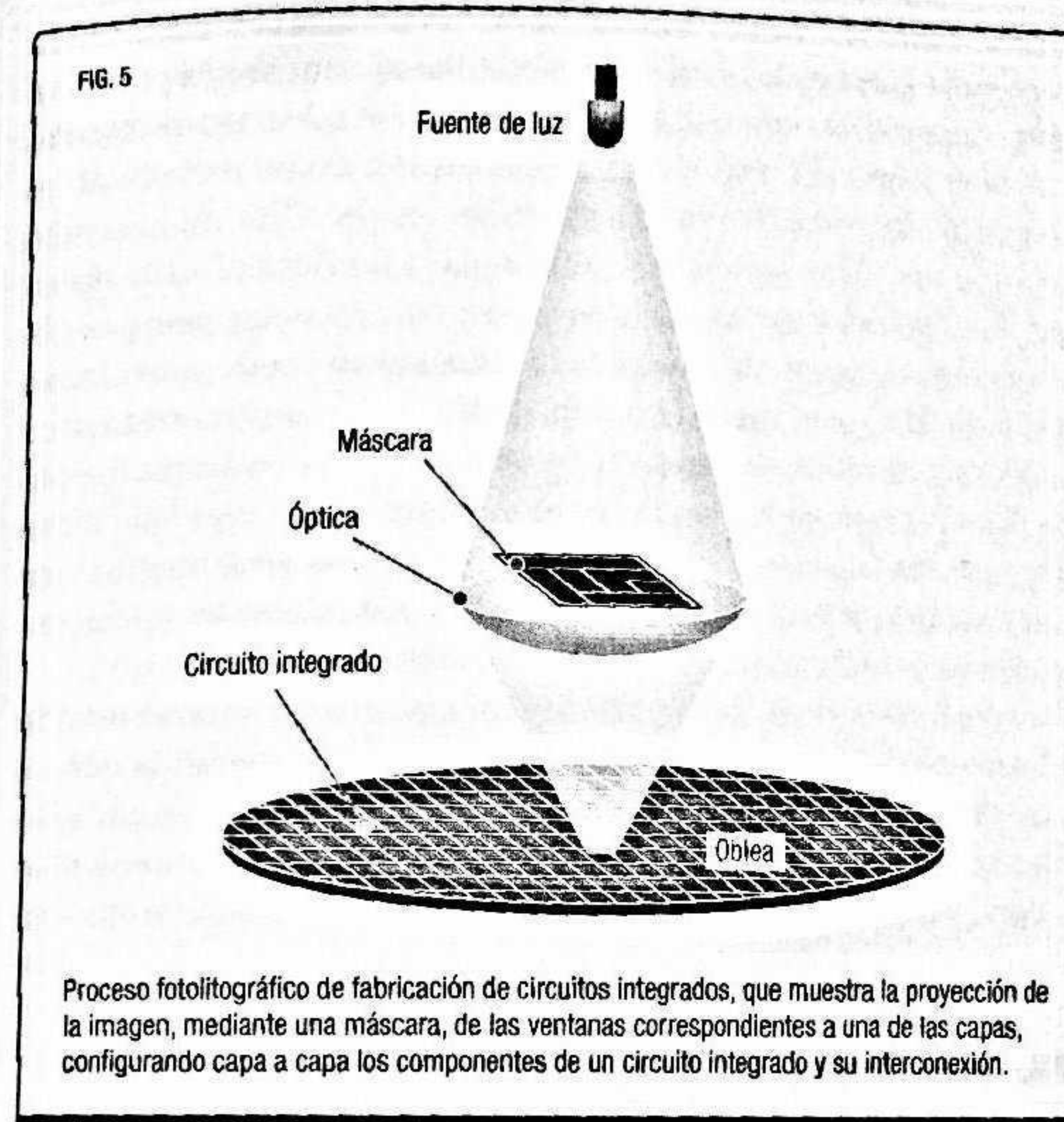
Transistor tipo PNP (izquierda) y tipo NPN (derecha), y expresión de su ganancia.

sistor. Esta técnica consiste en definir selectivamente ventanas sobre una lámina de cristal de silicio (oblea), tanto para producir por difusión de componentes químicos materiales de tipo P o de tipo N con objeto de configurar transistores, como para establecer metalizados de conexión entre elementos. Este mismo procedimiento puede utilizarse también para fabricar un transistor como componente individual, o miles de ellos. Así pues, la fabricación de un circuito integrado consiste en producir sobre la oblea no solo los transistores, sino también las conexiones entre ellos y las resistencias necesarias para constituir un circuito determinado, aunque este requiera un número muy elevado de transistores. Para ello es necesario provocar los procesos de difusión cada vez con dimensiones más reducidas, a fin de poder ubicar en una misma oblea un mayor número de componentes.

En los procesos fotolitográficos, para configurar esas ventanas submilimétricas se aplican resinas fotosensibles sobre la oblea, que serán degradadas mediante la exposición a la luz (figura 5). Cuando se proyectan imágenes de las distintas áreas mediante máscaras, esta resina protectora podrá ser retirada selectivamente de las zonas que hayan resultado iluminadas mediante un lavado, dejando expuestas estas áreas del cristal. Un posterior proceso de difusión producirá en estas zonas habilitadas material de tipo N o de tipo P. Este proceso se repite para cada capa que convenga realizar para poder conseguir las conexiones necesarias sin interferencias.

Los primeros circuitos integrados que implementaban funciones lógicas aparecieron en 1958, y desde entonces la capacidad de integración no ha cesado de incrementarse, al perfeccionarse las técnicas fotolitográficas. Para poder seguir aumentando la integración del creciente número de transistores en el mismo componente (chip) y conseguir procesadores más potentes o con mayor capacidad de memoria, se presentaban básicamente dos aspectos limitantes: el espacio ocupado por cada transistor en la oblea y su disipación.

La reducción del tamaño de los componentes se consiguió inicialmente disminuyendo la longitud de onda de la fuente de iluminación utilizada para la proyección de las máscaras, para reducir



la borrosidad causada por la difracción. Empleando luz ultravioleta se consiguió rebajar el tamaño del canal proyectado que produce cada transistor, pasándose de los 10 μm (diez millonésimas de metro) de los primeros circuitos integrados a los 3 μm en 1975. Diez años más tarde, y utilizando los rayos X, se logró reducir el tamaño del canal a 1 μm . Una reducción aún mayor se consiguió con la implantación iónica, lográndose una continua reducción de la anchura del canal hasta alcanzarse los actuales 14 nm (catorce milésimas de millonésima del metro).

Para poder integrar un mayor número de componentes en un mismo circuito integrado, hubo de resolverse el segundo aspecto limitante: la reducción de la disipación de cada transistor. Ello se consiguió con la introducción de la tecnología MOS

(*Metal-Oxide-Semiconductor*). Esta tecnología se caracteriza por conseguir que la corriente de conducción no se obtenga con una corriente de control, como sucede en los transistores bipolares, sino con una tensión, a través de un electrodo aislado. Al no requerir una corriente de conducción, en principio la potencia perdida con esta tecnología sería nula. En realidad esto no es así, porque también se requiere una pequeña corriente para la carga o descarga de la capacidad intrínseca del transistor. Junto a la gran disminución de la potencia disipada por cada transistor MOS, esta tecnología también permite evitar la potencia disipada por las resistencias en los circuitos implementados mediante transistores bipolares, al poder sustituir estas resistencias por transistores MOS complementarios, que evitan la disipación tanto con el circuito en estado 1 como en estado 0.

De este modo se ha logrado incrementar de forma sostenida el proceso de integración, y fabricar circuitos integrados que ya han alcanzado los miles de millones de transistores en un solo componente. Esto ha hecho posible fabricar procesadores más complejos y memorias de mayor capacidad, evolución que ha impulsado el desarrollo tecnológico de los últimos años, sobre todo de la informática, de los sistemas complejos de control y muy especialmente de la robótica.

SISTEMAS LÓGICOS Y SISTEMAS SECUENCIALES

La aparición del transistor en los años cincuenta del siglo pasado propició, por una parte, el desarrollo de una amplia gama de equipos robustos para la regulación automática aplicables al control de variables físicas o químicas tales como la velocidad, el caudal, la presión, la fuerza, la temperatura o la concentración en todo tipo de procesos industriales. Por otra parte, el transistor impulsó la introducción de la electrónica digital basada en la lógica, que constituye la base del desarrollo de los autómatas programables, un elemento básico en la automatización.

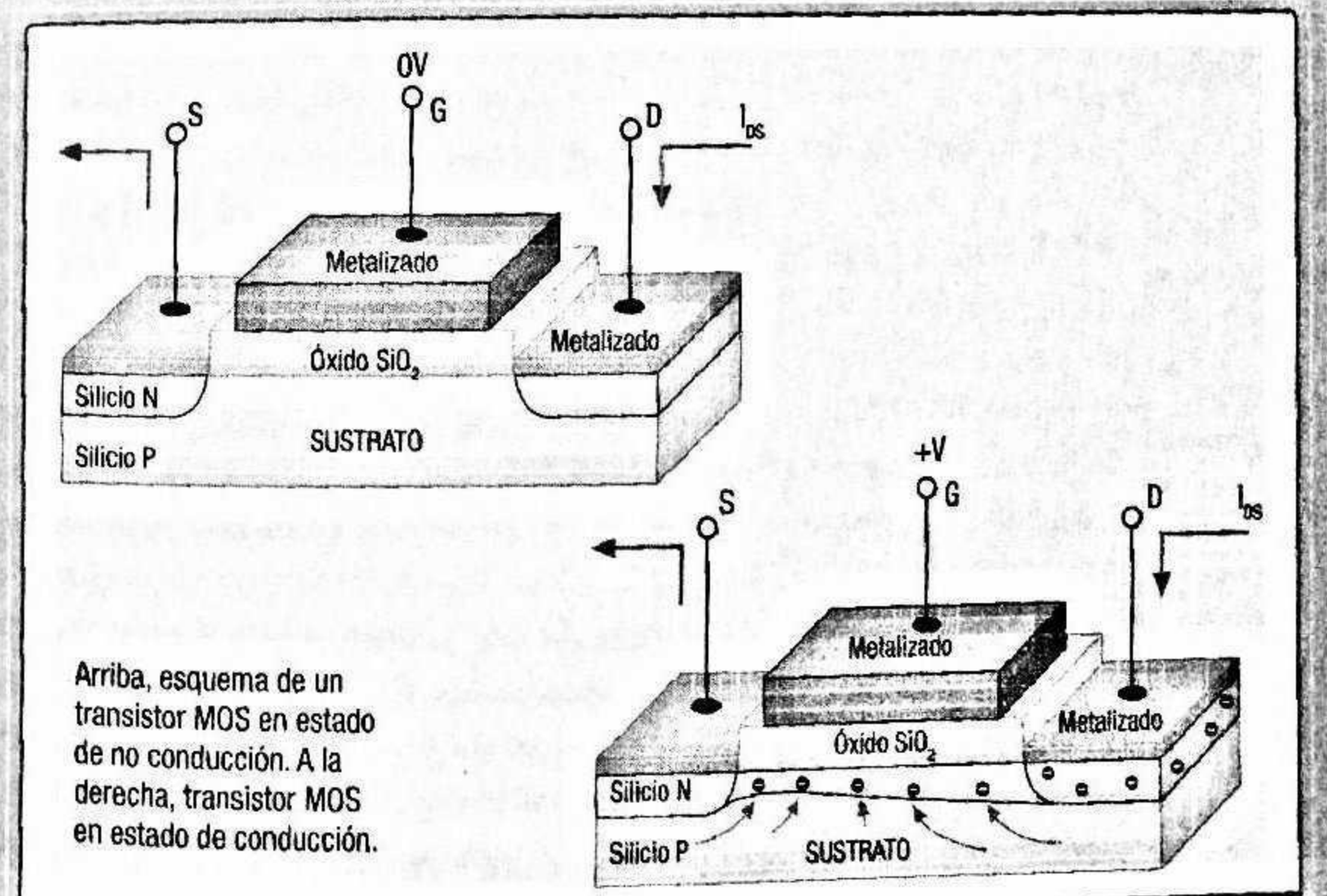
Los sistemas lógicos están basados en el procesamiento de señales lógicas (únicamente dos estados) que constituyen las entradas

EL TRANSISTOR MOS

El transistor MOS se caracteriza por pasar del estado de no conducción al de conducción mediante la aplicación de una tensión sobre un electrodo aislado. Para ello, este componente está constituido por un sustrato de silicio tipo P (con huecos de electrones en la estructura cristalina) y dos porciones de material de tipo N sobre los que se fijan los terminales de entrada (D) y salida (S), como se muestra en la figura. Un tercer electrodo, que constituye la puerta de control (G), consiste en un metalizado situado sobre una capa aislante dispuesta sobre el sustrato de silicio P. Es por ello por lo que este transistor se denomina *Metal-Oxide-Semiconductor*.

Cómo funciona el transistor MOS

Al recibir una tensión de control, la puerta no produce corriente de conducción, ya que este electrodo se encuentra aislado del resto del componente. Cuando esta puerta no está en tensión, no se produce la conducción de la corriente I_{DS} , ya que en el camino del electrodo D al S se encuentra una unión NP que en este sentido no es conductora (véase el esquema superior de la figura). Al aplicar una tensión en el electrodo de la puerta G atraerá electrones en su entorno, con lo que la zona P del sustrato (con ausencia de electrones) se comportará como si se convirtiera en N. De este modo, hace desaparecer la barrera NP del camino entre el borne D y el borne S y el transistor pasará al estado de conducción (véase el esquema inferior de la figura).

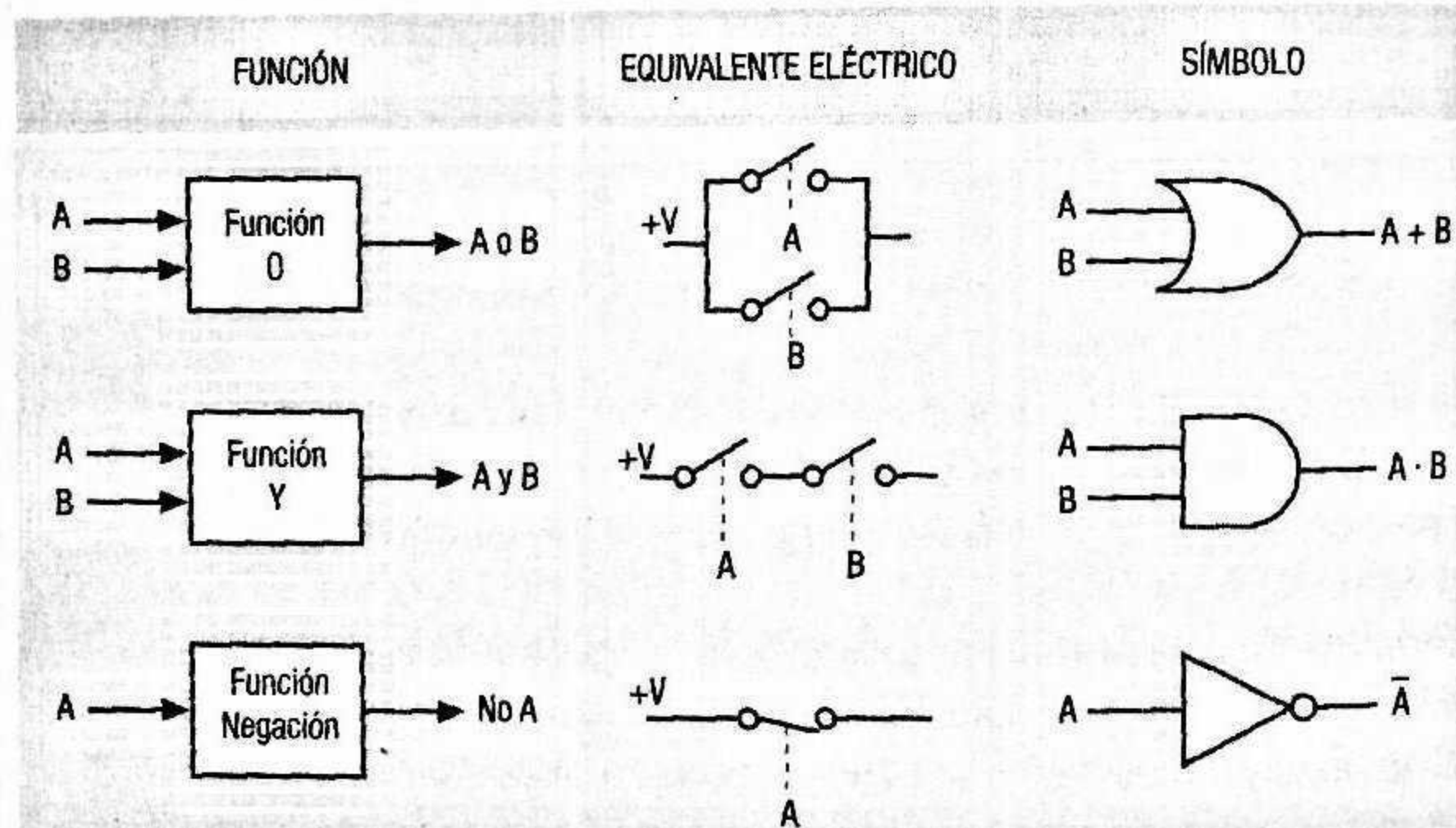


del sistema, que mediante algoritmos lógicos permite la obtención de salidas de control. Estos algoritmos, por complejos que sean, pueden implementarse a partir de solo tres funciones muy elementales, que se representan en la figura 6:

- La función O, en la que la salida de este operador es 1 cuando una o más de sus entradas es 1.
- La función Y, en la que la salida de este operador es 1 cuando todas sus entradas son 1.
- La función NO o función negación, en la que la salida de este operador es 1 cuando su entrada es 0.

La incorporación de dispositivos lógicos en los procesos de producción, junto con la regulación automática, constituyó el primer paso hacia la automatización. A modo de ejemplo, disponiendo de células fotoeléctricas como detectores de pre-

FIG. 6



Funciones lógicas básicas. Mediante las tres funciones lógicas básicas O, Y y NO (negación), es posible la implementación de cualquier circuito digital, por complejo que sea.

sencia en una cinta transportadora, se puede introducir fácilmente un sistema automático de selección de objetos por sus dimensiones.

Si los objetos A, B y C tienen alturas distintas (figura 7) se distinguen a partir del número de sensores activados y con esta información pueden ser clasificados, por ejemplo, para proceder a su correcto empaquetado. En este caso, la pieza A producirá en los sensores S1, S2 y S3 la información lógica 110, que corresponde a los sensores S1 y S2 activos y el S3 inactivo por ocultación de su luz incidente. En el caso de la pieza B, la información obtenida será 100, y para la pieza C será 000. Con estas variables como entradas se podrán generar las funciones de salida FA, de presencia de la pieza A; FB, de presencia de la pieza B, y FC, de presencia de la pieza C. Para expresar estas funciones lógicas utilizaremos la grafía X cuando la variable tiene el valor 1 y \bar{X} cuando tenga el valor 0. En este caso, si las variables de entrada son S1, S2 y S3 y las variables de salida (de identificación de cada pieza) son FA, FB y FC, estas funciones serán:

$FA = S2 \cdot S3$ (S1 no se considera, dado que si S2 está iluminado también lo estará S1).

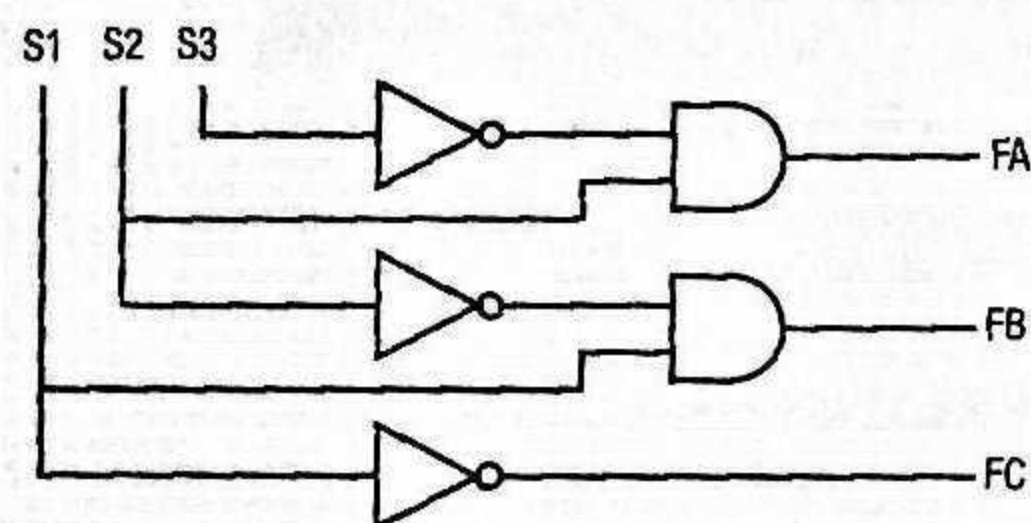
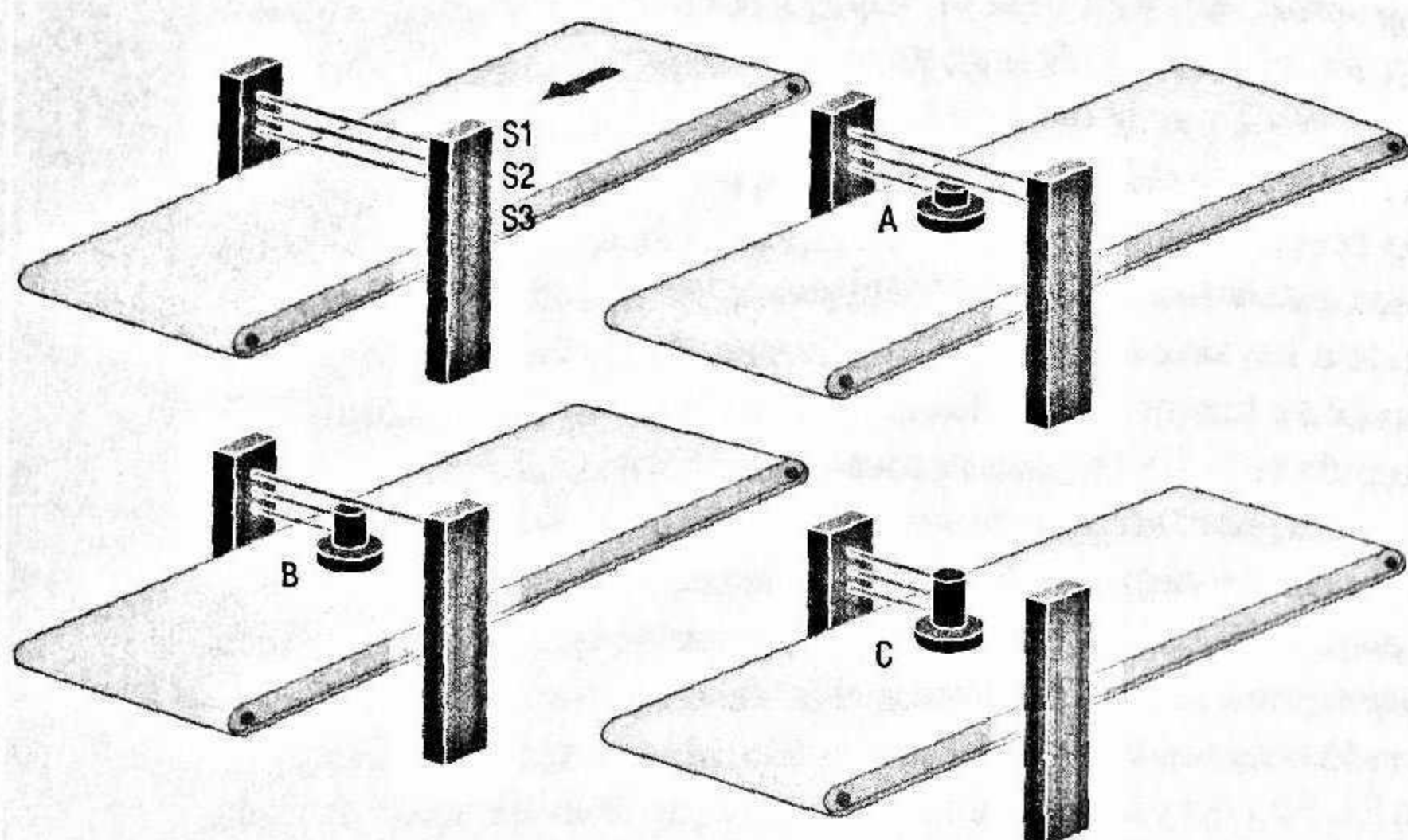
$FB = S1 \cdot S2$ (S3 no se considera, dado que si S2 está oculto también lo estará S3).

$FC = S1$ (no se consideran S2 y S3, dado que si S1 está oculto también lo estarán S2 y S3).

De esta forma, la implementación de estas tres funciones lógicas A, B y C a partir de las señales S1, S2 y S3 obtenidas de los tres sensores será la indicada en el esquema inferior izquierdo de la figura 7.

Mediante las tres funciones lógicas básicas (función O, función Y y función NO) ha sido posible implementar esta simple función de clasificación, y de la misma forma puede implementarse cualquier otra función lógica dependiente de variables lógicas de entrada. Sin embargo, los procesos de automatización requieren también poder disponer de la función memoria. La función memoria es un operador que posee dos estados,

FIG. 7



Arriba, detección fotoeléctrica de piezas por su altura. La pieza A produce en los sensores S1, S2 y S3 la información lógica 110; la pieza B producirá 100; la pieza C, 000. A la izquierda de estas líneas, esquema de la implementación de la función lógica que permite la clasificación de los objetos A, B y C.

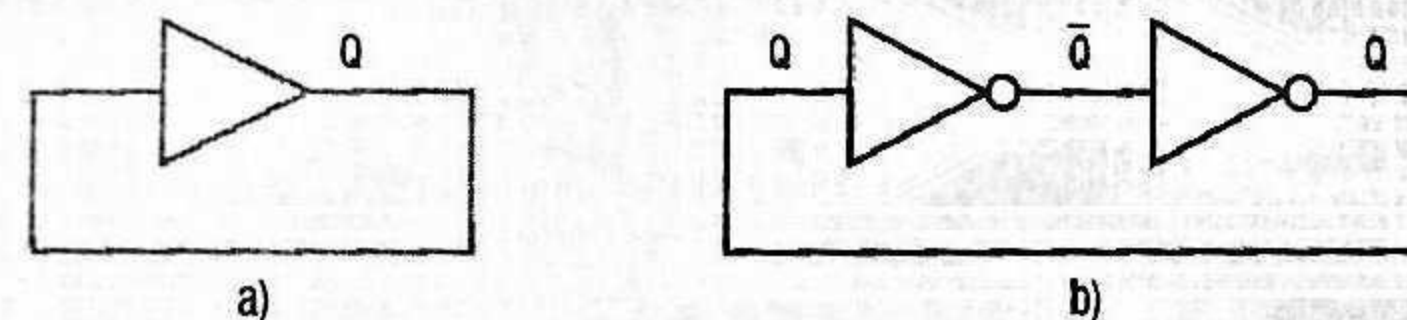
$Q = 0$ si no se ha producido un evento y $Q = 1$ si el evento ya se ha producido. En esta función, su salida Q permanece a 0 mientras no se produce un evento determinado que genera la entrada lógica de activación (puesta a 1 o *set*). Para implementar esta función, basta con realimentar un amplificador, conectando su salida a su entrada. Si su salida Q está en estado 0, su entrada también lo estará, y así permanecerá indefinidamente. En cambio, si su salida Q está en estado 1, su entrada también lo estará y permanecerá así de forma indefinida. Esta función

memoria puede ser implementada tanto con un amplificador como con dos inversores, tal como se muestra en la figura 8.

Pero, puesto que toda función memoria debe disponer de una entrada para su activación y otra para su desactivación o borrado (puesta a 0 o *reset*), cada inversor puede ser sustituido por funciones O negadas, para poder disponer de las entradas de activación (S) o de borrado de la memoria (R) (figura 9). Este circuito de memoria suele representarse de una forma equivalente, más simétrica y característica, como muestra el esquema b) de la figura 9. En el último esquema de la misma figura se muestra su respuesta temporal frente a una sucesión de eventos de memorización y borrado. Esta función memoria se denomina biestable, ya que posee dos estados estables.

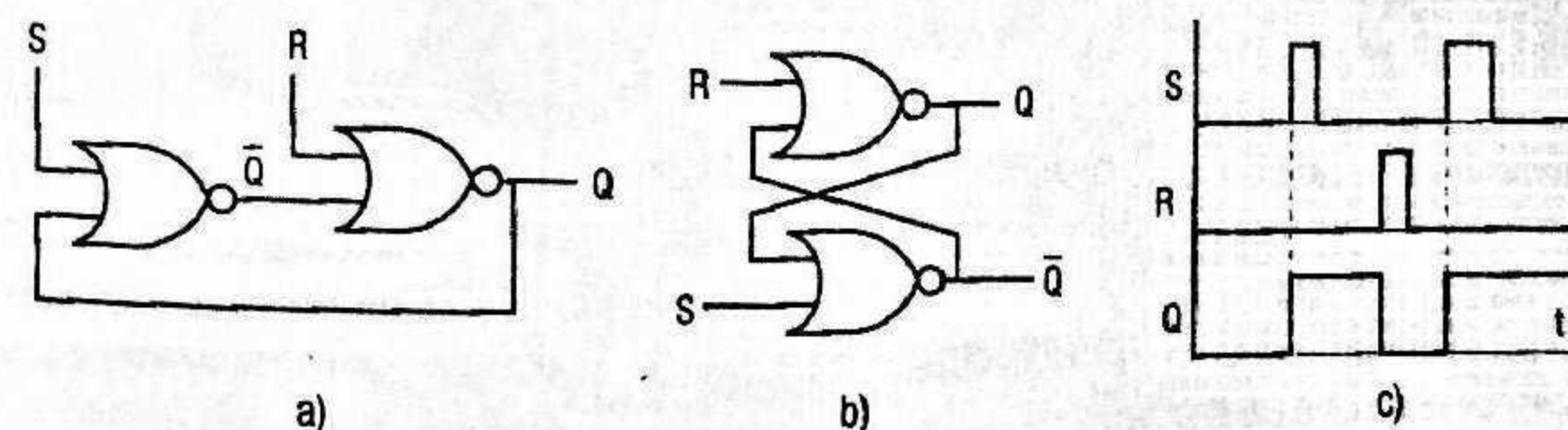
A pesar de poder expresar cualquier función lógica mediante las tres funciones básicas Y, O y NO, no es posible afrontar cualquier problema que pueda presentarse, ya que en muchos sistemas unas mismas variables de entrada pueden generar esta-

FIG. 8



Implementación de la función memoria con un amplificador (a) y con dos inversores (b).

FIG. 9

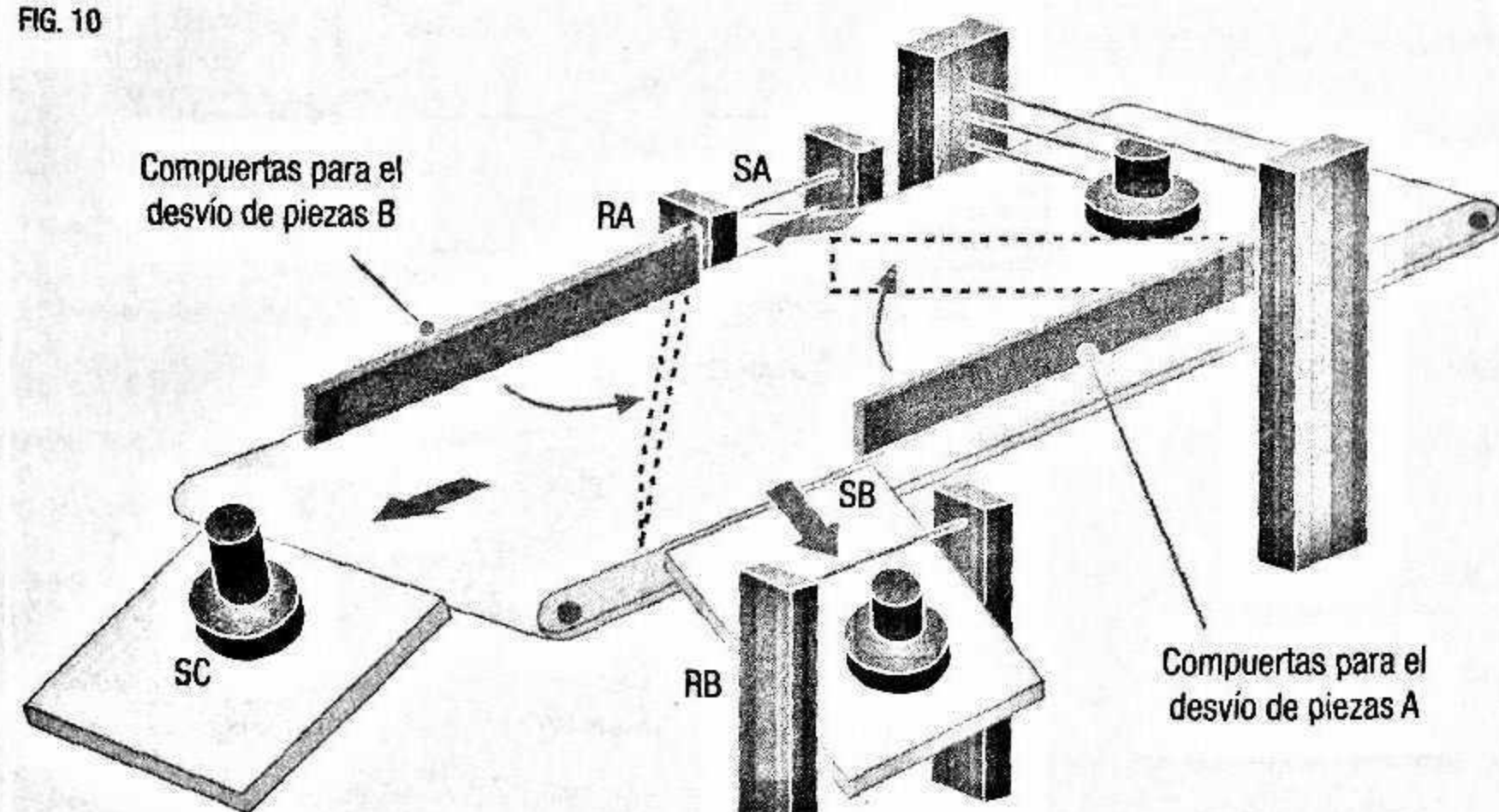


Representación y comportamiento de la función memoria. Función memoria con los inversores sustituidos por funciones O negadas, de modo que dispone de entradas de activación (S) y de borrado (R) (a), junto a su representación (b) y su comportamiento (c).

dos distintos de salida en función de las situaciones alcanzadas anteriormente. Es, pues, necesario utilizar la función memoria para generar estados internos del sistema, de forma que cada salida será una función lógica de las entradas y de las variables internas generadas o, lo que es lo mismo, de la memorización de situaciones anteriores. Estos sistemas capaces de generar unas salidas lógicas en función de las entradas lógicas y de los valores que estas variables han alcanzado con el tiempo se denominan *sistemas secuenciales*, y permiten implementar cualquier sistema, ya sea un automatismo, un controlador o un computador.

La necesidad de utilizar esta función memoria puede darse también en el ejemplo de clasificación de piezas de la figura 7. Si se desea que la detección de una pieza A, B o C permita la separación de las distintas piezas, se pueden introducir unas compuertas activadas por el clasificador ya desarrollado (figura 10). De esta forma, la apertura de una compuerta lateral permitirá desviar las piezas A hacia la salida SA, y la apertura de otra compuerta lateral SB

FIG. 10



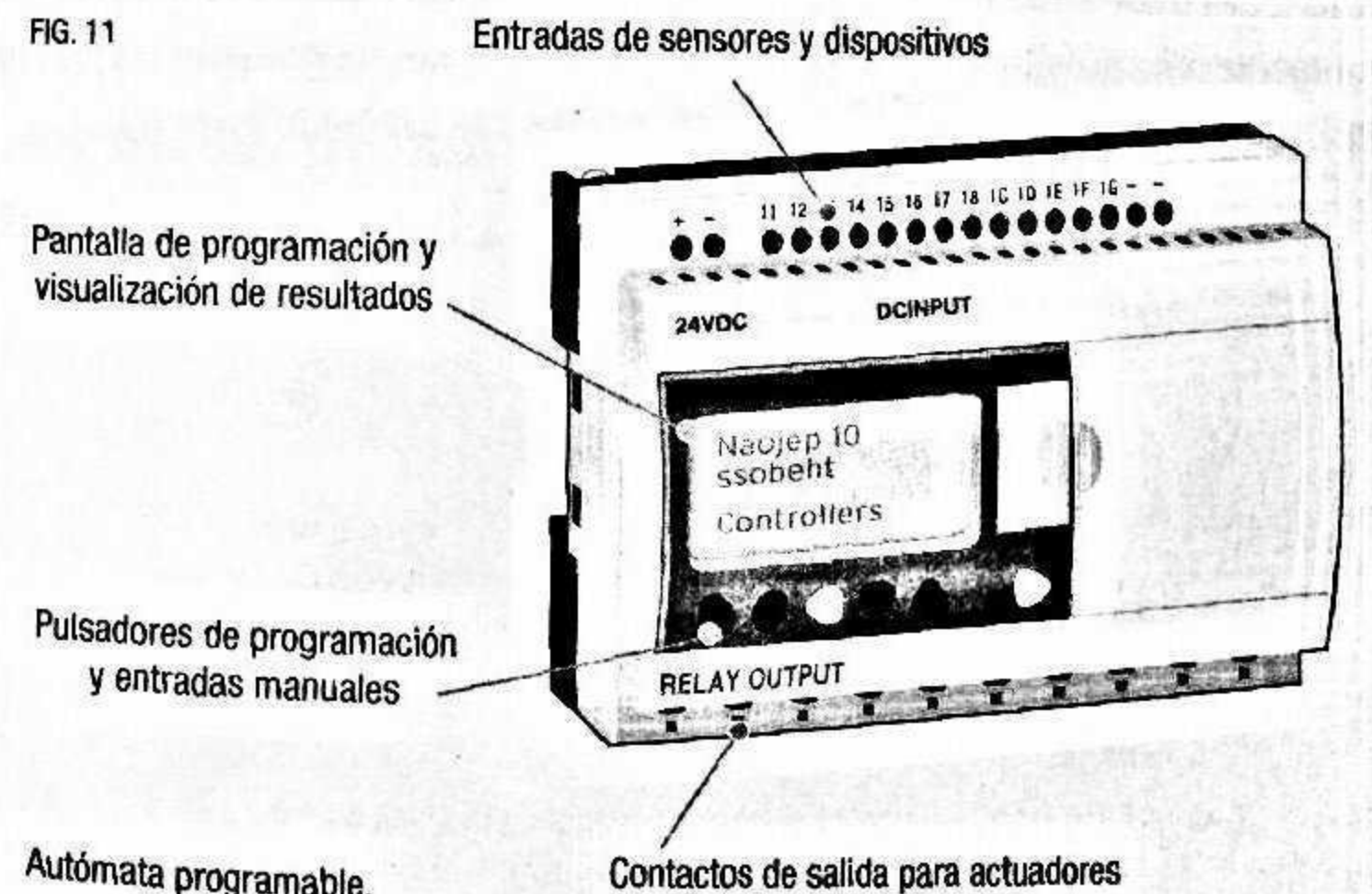
Clasificador de piezas por detección fotoeléctrica de alturas. Cuando se detecta una pieza B se abre la compuerta lateral correspondiente, que desvía la pieza hacia la salida SB. La célula fotoeléctrica RB detecta la salida de la pieza.

permitirá desviar las piezas B hacia la salida SB cuando las piezas A o B sean detectadas. Ambas compuertas deberán permanecer abiertas después de la detección del paso del objeto por el sensor fotoeléctrico de alturas y hasta que se haya producido su salida.

En este caso, pues, se hace necesaria la utilización de la función memoria, ya que la salida lógica del clasificador de alturas solo produce la salida adecuada durante el corto espacio de tiempo del paso de la pieza por delante del sensor. Las funciones lógicas FA y FB serán las entradas de activación de las funciones memoria QA y QB para que estas compuertas permanezcan activadas hasta la salida de las piezas. Así, será preciso generar otra función de borrado, disponiendo de unas células fotoeléctricas RA y RB para detectar su salida.

Para la implementación de sistemas lógicos o sistemas secuenciales que se precisan para la automatización de procesos, no es necesario ni resultaría práctico utilizar elementos lógicos elementales discretos. Para ello se desarrollaron los *autómatas programables*, unos sistemas computerizados y robustos, dotados de un cierto número de entradas y de salidas que pueden implementar las funciones necesarias para cada aplicación (figura 11).

FIG. 11



Su programación puede realizarse mediante expresiones lógicas o mediante representaciones gráficas de los equivalentes circuitos eléctricos o electrónicos, para facilitar que puedan ser programados por personal sin conocimientos especializados.

Estos autómatas pueden disponer de entradas analógicas para la adquisición de datos, tanto para su visualización como para ser introducidos como variables lógicas, estableciendo valores umbrales, para activar alarmas o para activar salidas cuando se alcanza o rebasa un valor determinado, lo que permite generar señales lógicas binarias.

El desarrollo de los autómatas programables ha hecho posible introducir inteligencia distribuida en los procesos industriales, dado que aparte de realizar las funciones lógicas o secuenciales que se requieren para la automatización del proceso, la potencia de cálculo de los procesadores utilizados también permite realizar múltiples funciones adicionales. De este modo se pueden implementar estrategias de control basado en parámetros locales, la inteligencia a escala local, que puede complementar las estrategias a escala global, o incluso suplirlas en caso de fallos o de pérdidas de comunicación puntuales.

Esta capacidad de disponer de estrategias de control distribuido permite una mayor flexibilidad y capacidad de operación y aumenta la fiabilidad global del sistema, aunque puede resultar en funcionamiento degradado (sin todas las prestaciones).

CAPÍTULO 2

Concepto y principios de la robótica

A lo largo del siglo XXI la robótica multiplicará tanto sus prestaciones como sus aplicaciones, y tendrá cada vez mayor protagonismo en nuestra vida. Conocer sus principios básicos puede ayudarnos a entender lo que puede llegar a ser en los próximos años, sin confundir realidad y fantasía.

La introducción de la automatización en los procesos industriales acaecida a mediados del siglo pasado no permitía resolver todos los problemas que la industrialización presentaba para poder mecanizar tareas manuales que comportaban peligros o esfuerzos excesivos para el operario. Es por ello por lo que se iniciaron los esfuerzos para construir brazos mecánicos capaces de realizar movimientos asimilables a los de un brazo humano, sustituyendo la complejidad de la mano por una pinza diseñada para poder manipular objetos específicos.

La necesidad de disponer de estos brazos robóticos se agudizó con el desarrollo de la energía nuclear a principios de la década de 1950. La radiactividad de los elementos utilizados en las centrales nucleares obligó a desarrollar los primeros robots teleoperados para la fabricación y manipulación de las barras de combustible. Se trataba de emular la visión futurista del autor checo Karel Čapek, que expuso en su obra de teatro de ciencia ficción *RUR (Robots Universales Rossum)*, estrenada en 1921. En esta obra se construyen hombres artificiales, más eficientes laboralmente, para liberar a los humanos del trabajo manual. Estos trabajadores, *robota* en checo, dieron nombre a los actuales robots.

¿QUÉ ES UN ROBOT?

Las primeras definiciones de robot se introdujeron a principios de los años setenta del siglo pasado sin un consenso generalizado. Así, la *Japan Robotics Association* (JRA) define el robot como «un manipulador multifuncional que puede ser programado para la realización de tareas muy variadas». En Europa, la norma ISO 8373 lo define como «manipulador multifuncional programable en tres o más ejes y automáticamente controlado, ya sea sobre una base fija o sobre una móvil, para ser utilizado en aplicaciones de automatización industrial». En la actualidad el concepto de robot ha buscado una definición más amplia y flexible, como la de la prestigiosa asociación internacional *IEEE Robotics and Automation Society*, que lo define como «una máquina inteligente para usos muy diversos, como la exploración espacial, los servicios o la fabricación».

Así pues, actualmente el de robot es un concepto muy amplio que se extiende desde los clásicos robots industriales a los robots autónomos (terrestres, aéreos o submarinos), o a los nanorrobots. Esta idea de robótica puede considerarse incluso de forma más amplia, ya que ciertos dispositivos informáticos, como un buscador de información en la red, también se asocian a un robot.

Circunscribiéndose a la robótica industrial, un robot está constituido por diversos elementos, que pueden asimilarse a los distintos órganos y sistemas de un operario humano:

- Estructura mecánica, formada por los distintos elementos articulados que configuran la estructura del robot, que le confiere la robustez acorde con la carga que va a transportar, la precisión esperada y las dimensiones del espacio de trabajo alcanzable. La estructura mecánica equivaldría al esqueleto de un operario humano.
- Actuadores, que confieren el movimiento al robot. Pueden ser tanto motores eléctricos como dispositivos hidráulicos, neumáticos o incluso piezoeléctricos. En términos comparativos a un operario humano, los actuadores equivalen al sistema muscular.

- Elemento terminal, que viene condicionado por la tarea que va a realizar el robot; por ejemplo, en pintura el elemento terminal sería un pulverizador, en soldadura serían los electrodos y sus complementos y en manipulación, unas pinzas o garras apropiadas. El elemento terminal equivale a nuestras manos.
- Unidad de control del robot, constituida por el computador o conjunto de computadores que proporcionan la capacidad de memorizar y ejecutar el programa de actuación acorde con cada tarea. La unidad de control puede compararse con el cerebro de un operario humano.
- Sensores del entorno necesarios para adaptarse a las condiciones de trabajo. Estos sensores permiten, por ejemplo, la detección y localización de piezas, obstáculos del entorno o captación de esfuerzos, y proporcionan la información necesaria para adaptar el programa de actuación a la situación real en el espacio de trabajo cuando este no puede ser completamente preestablecido. Equivalen a los órganos sensoriales humanos, especialmente la visión y el tacto.
- Interfaz de usuario, como elemento de comunicación persona-máquina. Es un elemento imprescindible para programar, introducir modificaciones, verificar y poder supervisar la tarea realizada.

El conjunto de estos elementos que configuran un robot definirán sus principales características y prestaciones, así como sus aplicaciones.

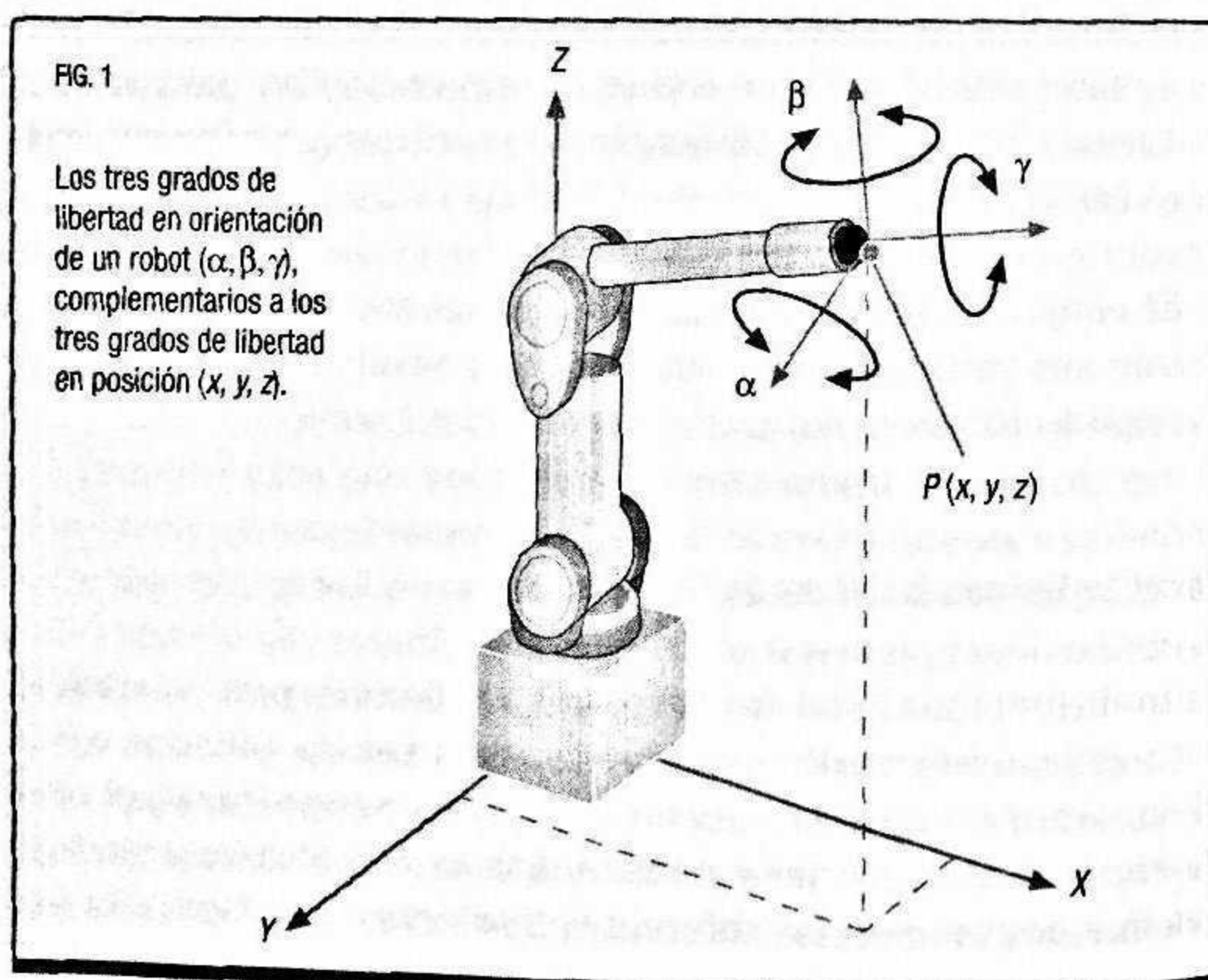
Características básicas de los robots

La multifuncionalidad del robot lo hace flexible para adaptarse a un gran número de aplicaciones. Los robots difieren entre ellos, tanto en su estructura física como en sus prestaciones de capacidad sensorial y control. Las principales características que determinan las diferentes tipologías de robots son los grados de libertad, la precisión, la repetitividad, la capacidad

de carga, los sistemas de coordenadas y la accesibilidad y redundancia.

El concepto de grado de libertad está asociado a la capacidad de realizar un movimiento. El número de grados de libertad de un robot es el de movimientos independientes que puede realizar en el espacio de trabajo. Para poder posicionarse en cualquier punto del espacio tridimensional (x, y, z) dentro del volumen de operación del robot, se precisarán tres grados de libertad. Pero si además se necesita orientar el elemento terminal, se precisarán otros tres grados de libertad (α, β, γ) , como muestra la figura 1.

Así pues, un robot suele tener seis grados de libertad. Sin embargo, en muchas aplicaciones no se necesita disponer de todas las posibles orientaciones del elemento terminal. Por ejemplo, un robot utilizado para realizar montajes de inserción de piezas sobre una mesa de trabajo solamente necesitará el desplazamiento en el espacio tridimensional y la rotación sobre el eje del elemento terminal, es decir, cuatro grados de libertad.



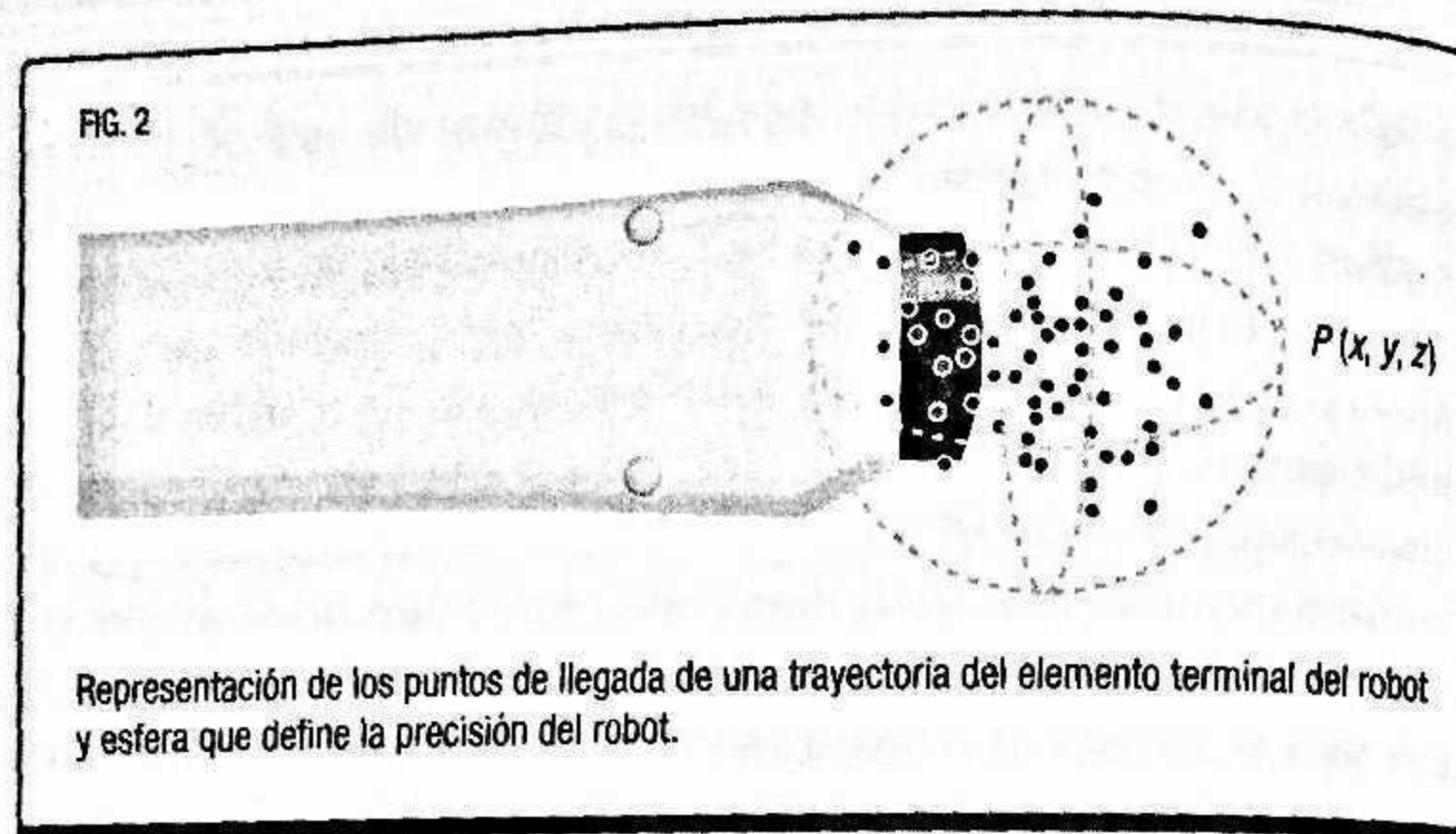
Para disponer de los grados de libertad necesarios, un brazo robótico está constituido por un conjunto de articulaciones. Estas pueden ser de tipo angular o lineal, es decir, un elemento se mueve respecto al anterior girando un determinado ángulo o efectuando un determinado desplazamiento, respectivamente.

Los grados de libertad no tienen por qué coincidir necesariamente con el número de articulaciones y sus correspondientes actuadores, pero un cierto número de grados de libertad requiere, como mínimo, el mismo número de actuadores.

El concepto de grado de libertad es igualmente válido en el caso de los robots móviles. Las ruedas de una plataforma permiten un desplazamiento que corresponde a un grado de libertad; si las ruedas disponen de dirección, ello conlleva un nuevo grado de libertad. Asimismo, un robot con ruedas tendrá tres grados de libertad si por su configuración es capaz de desplazarse en dirección longitudinal y transversal, e independientemente orientarse.

La precisión de un robot viene dada por la capacidad de situar su elemento terminal en una cierta posición y orientación en el espacio, con un error inferior a un valor determinado. Estos errores de posicionado se producen debido a limitaciones diversas (de la estructura mecánica, de la resolución de los sensores de posición, etc.). La precisión del robot viene determinada por el radio de la esfera que contiene las posiciones alcanzadas al desplazarse a un punto objetivo propuesto, $P(x, y, z)$, cuando se realizan múltiples trayectorias, partiendo de posiciones de origen distribuidas aleatoriamente en el espacio (figura 2).

En cuanto a la repetitividad, puesto que en ciertas aplicaciones industriales, como en el montaje de piezas en una cadena de fabricación, el robot debe repetir un determinado movimiento partiendo de un punto origen fijado y llegar cada vez a un mismo punto destino y con la misma carga, la desviación de su punto destino real respecto al deseado varía menos que cuando esta trayectoria es aleatoria, dando un error, denominado *error de repetitividad*, menor que el error que define la precisión. Ello es debido a que los posibles desalineamientos o juegos mecánicos se ven afectados por la posición en el espacio del conjunto de



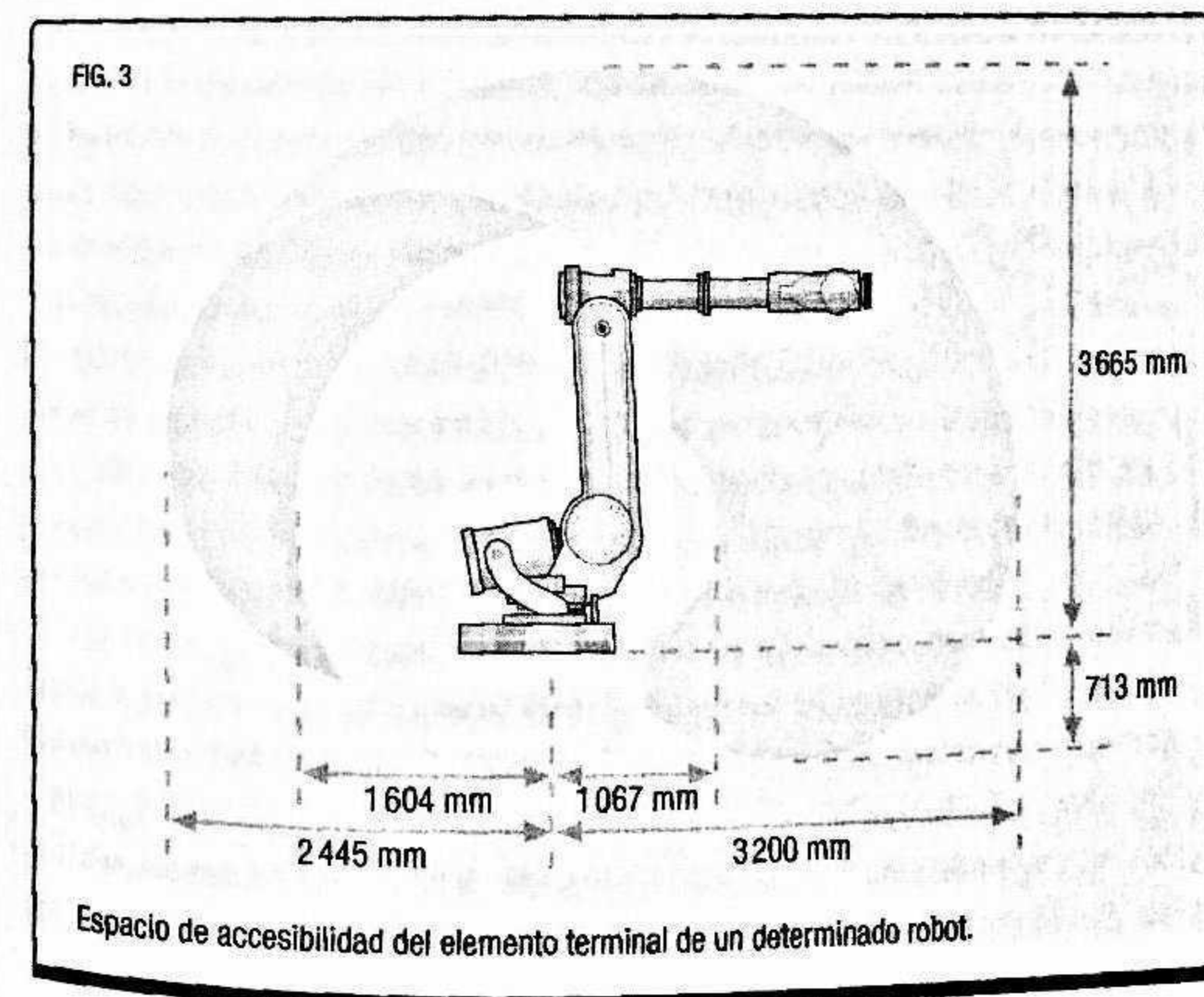
sus elementos articulados, lo que constituye la configuración del robot, y ello produce una menor dispersión de las posiciones alcanzadas al realizar una misma trayectoria.

La capacidad de carga de un robot es el peso máximo que puede soportar. Esta carga debe incluir no solo el objeto manipulado, sino también el peso del elemento terminal. Por otra parte, al calcular la capacidad de carga de un robot deben considerarse también los esfuerzos necesarios para vencer las inercias. Así, la fuerza realmente necesaria será el peso de estos elementos y las fuerzas inerciales definidas por el producto de su masa por la aceleración (o desaceleración) alcanzada durante la trayectoria. También ha de tenerse en cuenta que la capacidad de carga varía dependiendo de la configuración (posición de la carga en el espacio): para trayectorias cercanas al eje central del robot será mayor que para configuraciones con una mayor distancia al eje.

Otra característica importante de los robots son los sistemas de coordenadas. Las personas nos guiamos por movimientos en el espacio cartesiano, es decir, situamos un punto en el espacio intuitivamente determinando sus coordenadas en anchura, profundidad y altura (x, y, z). Las trayectorias o posiciones que definimos para programar un robot en su entorno de trabajo se consideran siempre en este sistema de coordenadas cartesianas. En cambio, el control del robot se efectúa a través del

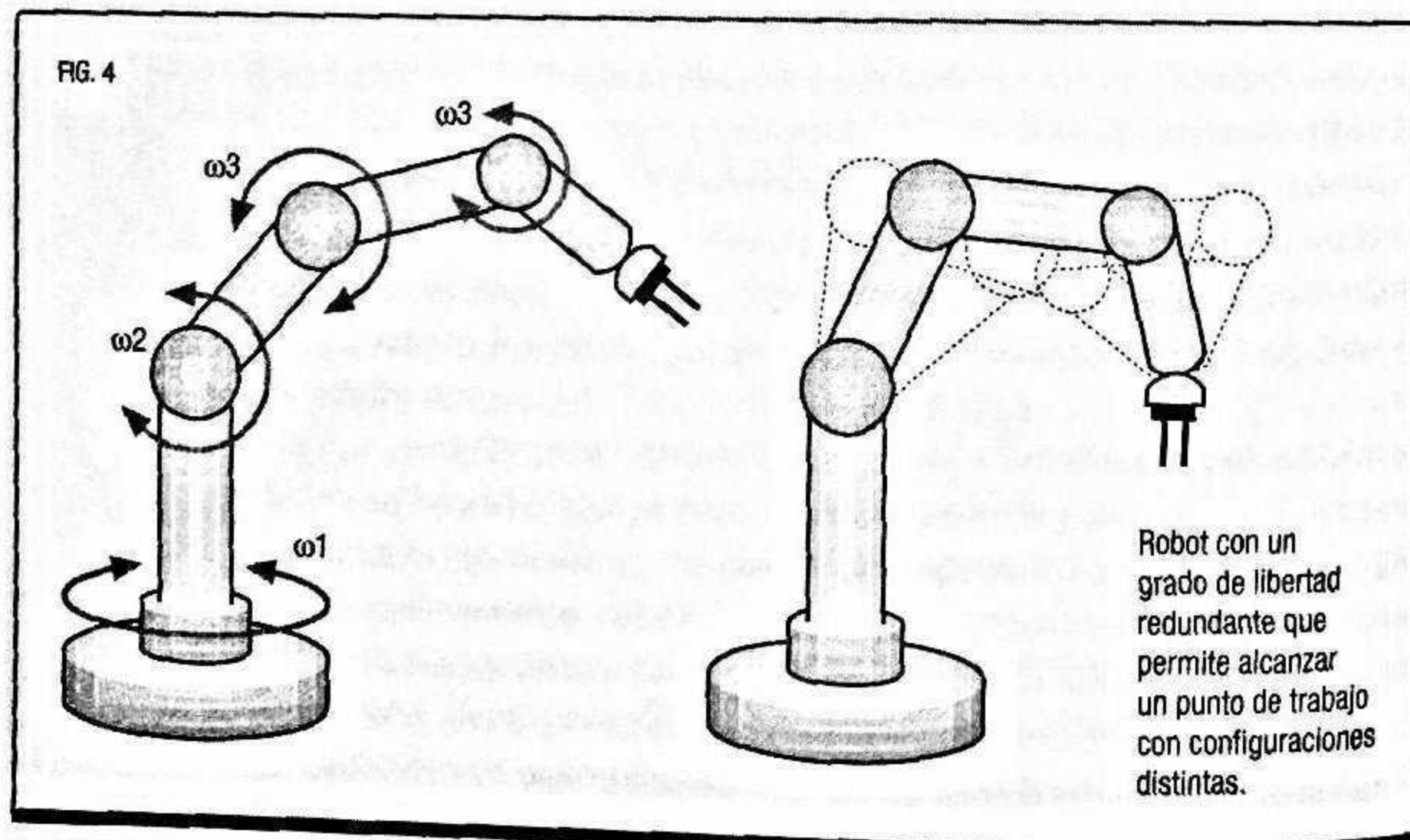
movimiento que se produce en cada una de sus articulaciones, las denominadas coordenadas articulares, que pueden ser cartesianas o angulares, por provenir o bien de una articulación de desplazamiento o bien de una de giro. Para programar una tarea definida en el espacio cartesiano será, pues, necesario realizar los cálculos correspondientes para hacer la transformación de un espacio al otro.

Por último, la accesibilidad y la redundancia también varían notablemente en cada tipo de robot. La arquitectura del robot y sus dimensiones determinan el volumen del espacio de trabajo. El volumen de trabajo será el espacio comprendido entre la curva definida por los puntos extremos que alcanza el robot con el brazo extendido y la que determina con el brazo retraído. La propia arquitectura del robot condiciona unos límites en el rango de los movimientos de cada articulación. Ello da lugar a volúmenes de trabajo con formas determinadas para cada arquitectura (figura 3), que condicionan la operatividad del robot para la realización de las tareas en un entorno determinado.



Además de la accesibilidad, es importante considerar también la maniobrabilidad, es decir, los movimientos que pueden realizarse en cada posición dentro del espacio de trabajo. Así pues, si consideramos un brazo totalmente extendido, en su posición extrema no puede colocar el punto distal en cualquier posición, ya que un giro en su orientación producirá un alejamiento de esta posición extrema.

Aunque un robot de seis grados de libertad puede moverse y orientarse dentro de los límites de su volumen de trabajo, la presencia de objetos u obstáculos puede impedirle alcanzar determinadas posiciones. Para conseguir aumentar la accesibilidad, aparece el concepto de *robot redundante*. Si en la arquitectura del robot, a sus primeras tres articulaciones —las que le confieren la capacidad de posicionado en el espacio tridimensional—, se le añade una cuarta articulación, dispondrá de cuatro grados de libertad, pero el espacio alcanzado será igualmente tridimensional. Por eso este cuarto grado de libertad se denomina *grado de libertad redundante*, y permite que el elemento terminal pueda alcanzar cada punto del espacio tridimensional con una misma orientación, pero con configuraciones distintas (figura 4).



TIPOS DE ROBOTS

La gran variedad de robots, consecuencia de la gran diversidad de aplicaciones y entornos de trabajo en la industria, hace conveniente plantear una clasificación de los robots industriales según sus características. En este apartado se tratarán los tipos de robot considerando su estructura mecánica.

Arquitecturas clásicas

Una característica que define la forma del espacio de trabajo de un robot es el tipo de articulaciones de que dispone para posicionar en el espacio su elemento terminal. La forma de este espacio de trabajo determinará su adecuación a un tipo concreto de operación y la accesibilidad en entornos específicos. Estas diferencias han dado lugar a una clasificación muy generalizada, que se recoge en la figura 5, basada en la secuencia de las tres primeras articulaciones del robot, las que determinan la posición del elemento terminal, no su orientación. Si estas son del tipo desplazamiento lineal, cada uno de estos desplazamientos estará orientado según los ejes X, Y y Z del robot y coincidirán con las coordenadas cartesianas (esquema a) de la figura 5), y por ello este tipo de robot se denomina *robot de coordenadas cartesianas*.

Si la primera articulación de desplazamiento se sustituye por una articulación angular, el robot abarcará un entorno cilíndrico, donde la segunda articulación corresponderá a la altura del cilindro y la tercera, a su diámetro. Este se denomina *robot de coordenadas cilíndricas* (esquema b) de la figura 5).

Si se sustituye también la segunda articulación lineal por otra articulación de giro, los dos primeros elementos del robot cubren un entorno en forma de casquete polar, mientras que la tercera articulación lineal representará el radio del casquete polar alcanzable por el robot. Es por ello por lo que este tipo de robot se denomina *robot de coordenadas polares* (esquema c) de la figura 5).

Finalmente, si las tres articulaciones son angulares, la posición del robot queda definida por estas variables angulares, por lo que se denomina *robot de coordenadas angulares*. Estos son los que tienen una mayor analogía con el brazo humano, por eso los elementos que los constituyen tienen una nomenclatura antropomórfica, como se indica en la figura 5 d).

En la práctica, estos espacios vienen condicionados por las limitaciones del rango de recorrido de cada una de las articulaciones. Así, por ejemplo, un robot angular, cuyas articulaciones

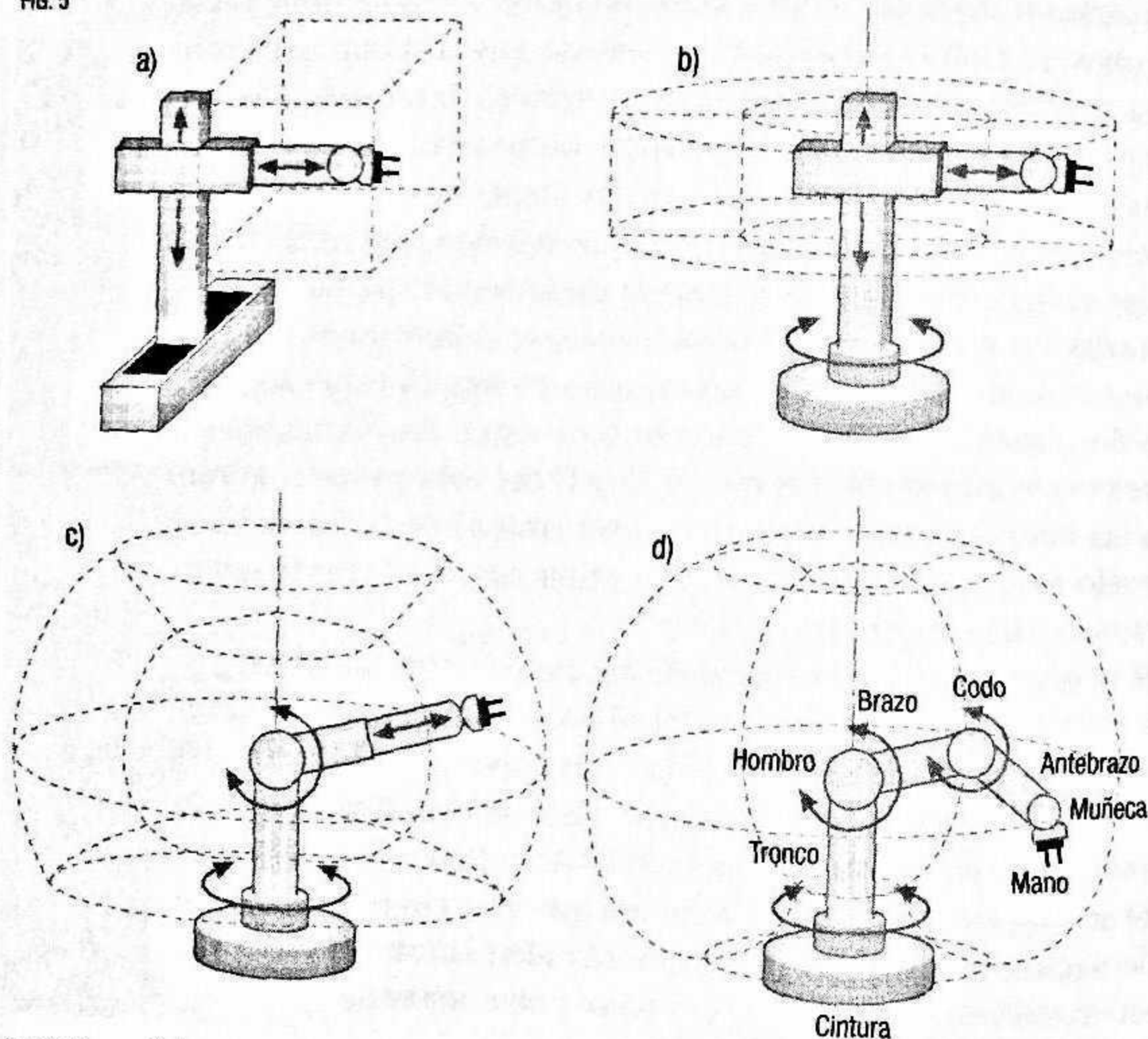
EL ROBOT SCARA

A principios de la década de 1980, Sankyo Seiki, profesor de la Universidad de Yamanashi, junto con las compañías japonesas Pentel y NEC, presentó una nueva estructura de robot, que estaba basada en un prototipo creado dos años antes por el profesor Hiroshi Makino. La novedad consistía en que tenía el primer o tercer grado de libertad de desplazamiento lineal, y los otros dos utilizaban actuadores angulares dispuestos con su eje de rotación en posición vertical.

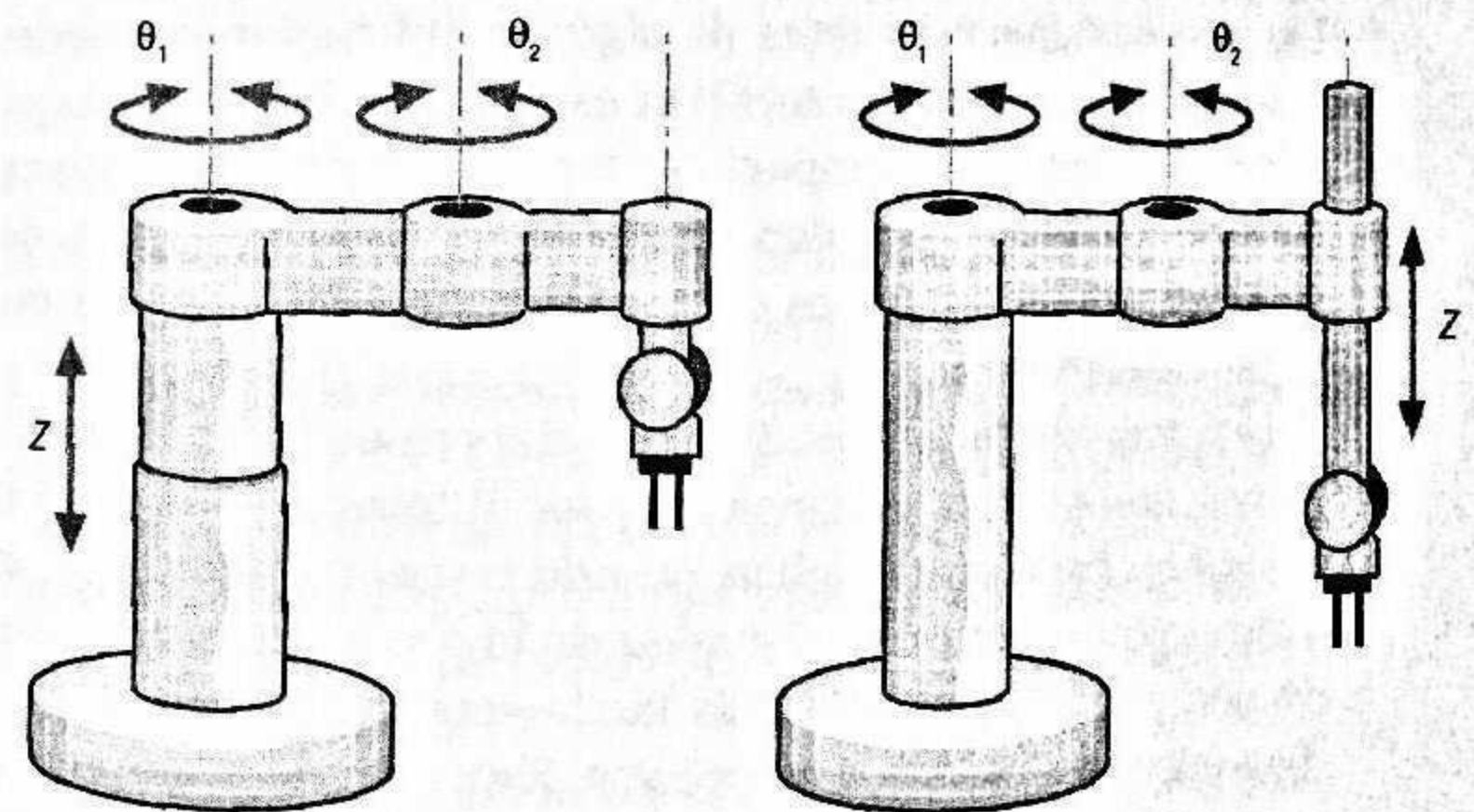
Nueva arquitectura, nuevas prestaciones

Esta arquitectura, que no era habitual, representa una ventaja considerable respecto a las arquitecturas clásicas, ya que consigue mantener el elemento terminal en posición vertical en torno al plano XY, algo que solo era propio de los robots cartesianos constituidos por actuadores lineales. Este tipo de arquitectura comporta una gran rigidez, al operar en un plano horizontal, y consigue mayor precisión y eficiencia que las clásicas arquitecturas polares o angulares. Sin embargo, también presenta una limitación, y es que solo es utilizable si el elemento terminal opera con un acceso vertical. Este robot fue presentado como *Selective Compliance Assembly Robot Arm*, por lo que se bautizó como SCARA. Solo un año después de su creación se introdujo en los sistemas comerciales de montaje, y desde entonces se ha popularizado ampliamente, ya que resulta muy adecuado para los trabajos de montaje de piezas pequeñas o medianas.

FIG. 5



Arquitecturas clásicas de robots según el tipo de articulaciones utilizadas. Robots de coordenadas cartesianas (a); de coordenadas cilíndricas (b); de coordenadas polares (c) y de coordenadas angulares (d). En el último se indican los nombres antropomórficos de sus elementos.



Arquitectura SCARA, muy apropiada para trabajos de acceso vertical. En el robot de la izquierda, el grado de libertad de desplazamiento lineal es el primero; en el de la derecha, el tercero. En ambos casos, el elemento terminal mantiene la posición vertical.

no tienen un recorrido de 360° debido a las limitaciones físicas de su propia estructura, puede dar lugar a un espacio de trabajo más complejo, como el que se mostraba en la figura 3. Por ese motivo, es necesario saber la forma del espacio de trabajo de un robot para evaluar su adecuación para una determinada aplicación.

Desde el punto de vista tecnológico, las articulaciones angulares generalmente resultan más robustas y de menor complejidad, por eso los robots de coordenadas angulares son los que han alcanzado una mayor cota de mercado. Sin embargo, la estructura cartesiana que equivale a un puente grúa ha sido también muy utilizada para la manipulación de grandes cargas, por ejemplo en astilleros y puertos. Por otra parte, los robots de coordenadas polares y los de coordenadas cilíndricas resultan muy adecuados para la carga y descarga en espacios confinados, como en el caso de prensas, máquinas de inyección o determinados centros de mecanizado.

Otras arquitecturas

Las necesidades concretas de algunas aplicaciones pueden requerir el diseño de arquitecturas específicas. Un ejemplo podría ser la necesidad de compaginar dos características contrapuestas como son la velocidad de operación y la precisión de posicionado en operaciones de inserción de componentes en una tarjeta electrónica.

Una arquitectura específica es la denominada «trompa de elefante», que se basa en concatenar los últimos grados de libertad del robot, cada uno de ellos girando respecto al anterior en un mismo plano. Eso permite adquirir una configuración ondulada que puede adaptarse más fácilmente al espacio de acceso disponible en entornos complejos. Este tipo de arquitectura es muy utilizado en robots de pintura, por su flexibilidad de acceso incluso en superficies situadas en la parte posterior del objeto que se va a pintar. En muchas aplicaciones, estas últimas articulaciones se recubren con una envoltura flexible que recuerda a la trompa de un elefante y que da nombre a esta arquitectura.

En algunos casos, varias articulaciones comparten un mismo actuador, de manera que las articulaciones forman un conjunto, que se dice que funciona de modo subactuado. Estas estructuras, conocidas como *arquitecturas subactuadas*, se emplean tanto para aumentar el rango de una articulación como para conseguir una simplificación mecánica. A modo de ejemplo, si a un desplazamiento lineal conseguido mediante un cilindro hidráulico conviene aumentarle el rango de desplazamiento y se utilizan varios cilindros concéntricos, el conjunto de cilindros comparten una misma variable de control.

Un caso distinto lo constituye la motorización de la mano de un robot humanoide. El movimiento de apertura y cierre de la mano requiere el accionamiento de 3×4 falanges más las dos articulaciones del pulgar. Dadas las dificultades de accionar la mano mediante los 14 actuadores necesarios, puede optarse por utilizar un único actuador para cada dedo, para producir una contracción o extensión mediante un tendón único por dedo. El ejemplo ilustra que un conjunto subactuado puede disponer de distintos niveles de subactuación.

Robots paralelos

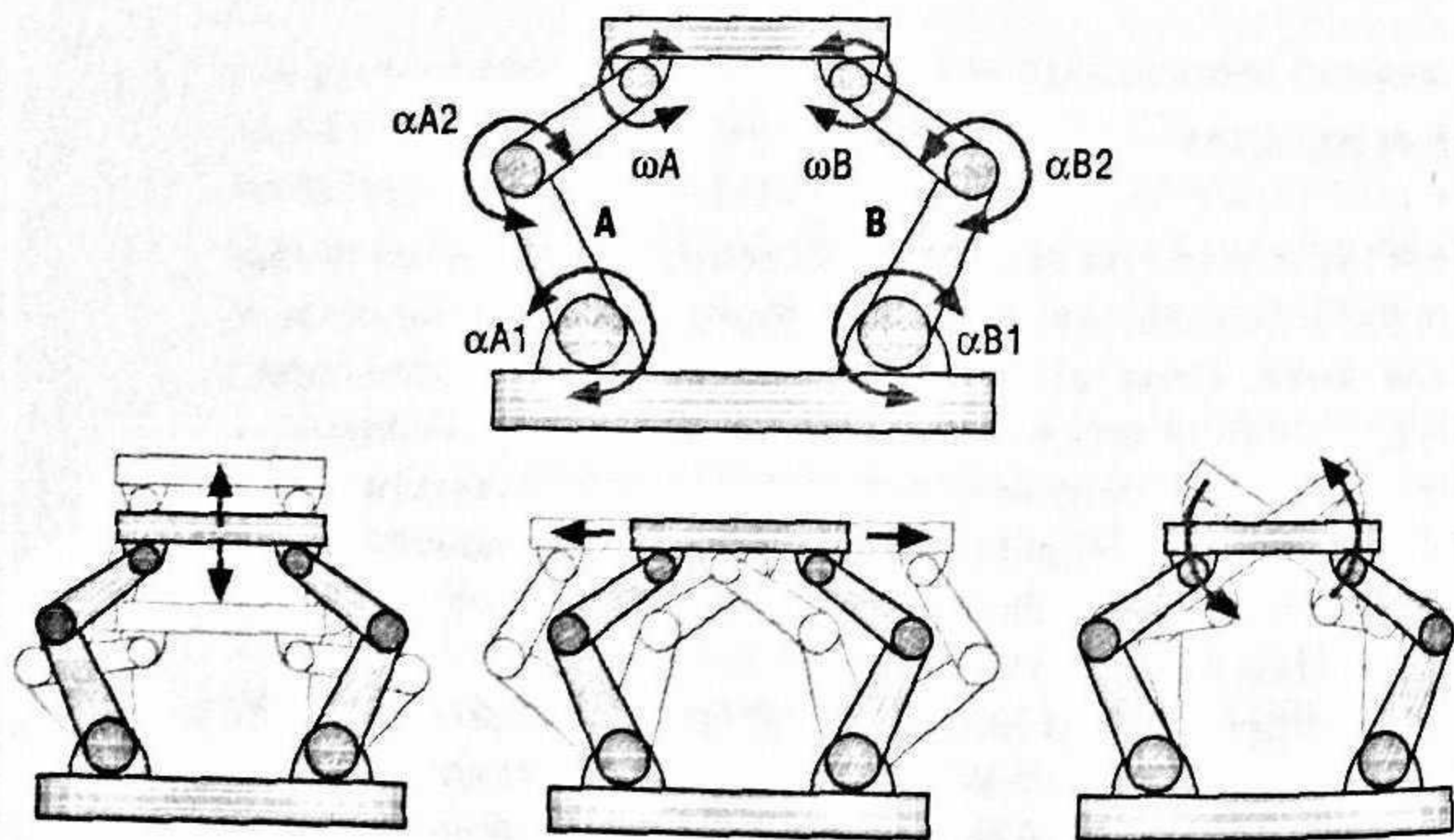
Todos los robots con estructura de brazo articulado sobre una base fija y con sus articulaciones concatenadas se denominan *robots serie*. Cada elemento articulado puede posicionarse, apoyado sobre la articulación anterior, con cualquier ángulo o desplazamiento dentro de su rango de operación, según se trate de una articulación angular o lineal, independientemente de las otras. La combinación de todas ellas define la configuración del robot en cada momento.

En contraposición al robot serie, el *robot paralelo* se caracteriza por disponer de más de un elemento articulado sobre la base fija, estando todos ellos en conexión con el siguiente elemento de la cadena cinemática o directamente con el elemento terminal. De esta forma, cada elemento de la cadena cinemática, que en los robots serie corresponde a un grado de libertad, en los

robots paralelos está compuesto de varios elementos articulados que dan lugar a un enlace con un cierto número de grados de libertad. Estas estructuras paralelas se caracterizan por poder transmitir directamente al eslabón posterior de la cadena cinemática los grados de libertad necesarios para una determinada aplicación, con una estructura mucho más rígida que en los robots serie, en los que cada elemento se sustenta sobre el anterior arrastrando sus errores de posición.

En la figura 6 se muestra una arquitectura paralela constituida por dos estructuras articuladas, A y B. En este hipotético caso, la estructura dispone de tres grados de libertad, el de los movimientos X e Y y el del giro en su plano bidimensional, como se aprecia en la parte inferior de la figura. Para definir su posición con tres grados de libertad no basta con accionar solo dos articulaciones, dado que debe haber al menos tantos actuadores como grados de libertad. Si por simetría no se desea

FIG. 6



Arriba, robot paralelo formado por dos estructuras articuladas, A y B. Debajo, grados de libertad de la estructura.

actuar únicamente sobre tres de ellas y se actúa sobre alguna más, la posición de la estructura queda *hiperdeterminada*. En esta arquitectura con tres grados de libertad, si por simetría se actúa sobre cuatro de ellas, por ejemplo $\alpha A1$, $\alpha A2$, $\alpha B1$ y $\alpha B2$, las restantes articulaciones, ωA y ωB , deberán poder posicionarse libremente (articulaciones pasivas). Cuando el número de actuadores coincide con el número de grados de libertad, es posible establecer una correspondencia entre cada posición de las articulaciones y una posición determinada.

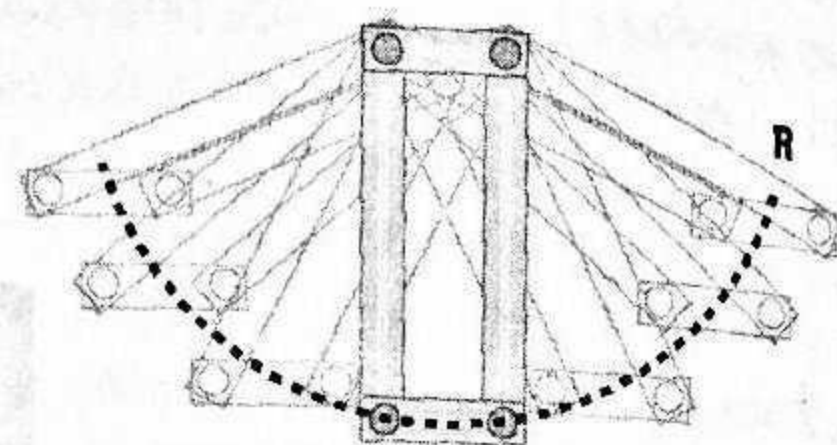
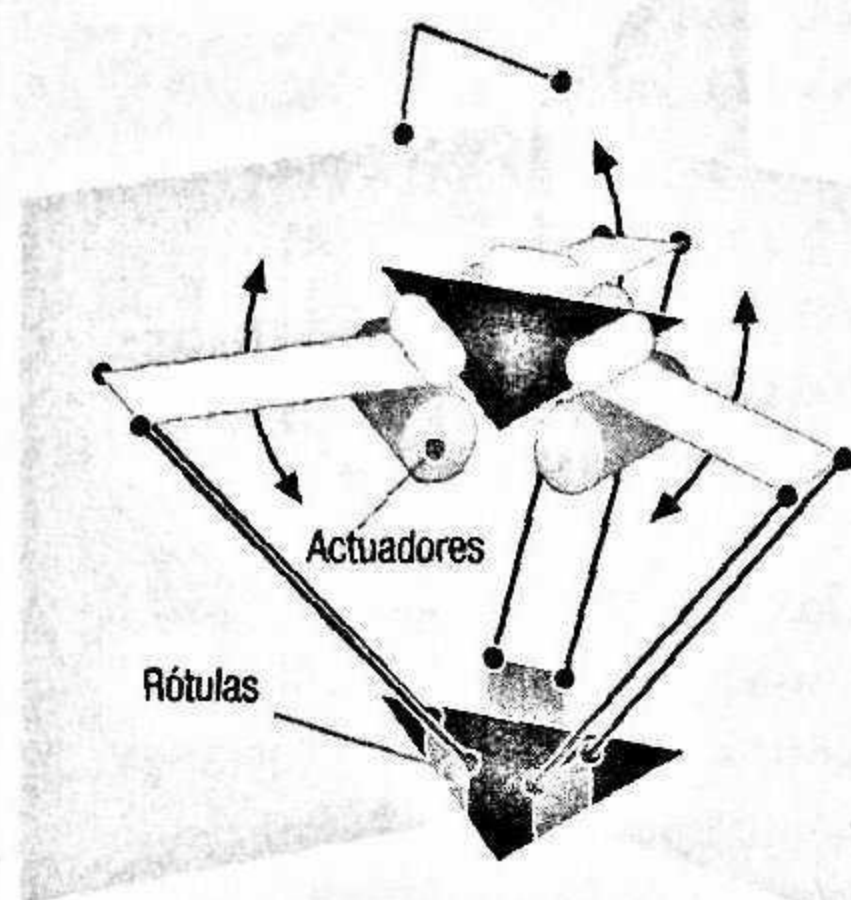
La hiperdeterminación, que se produce cuando se dispone de más actuadores que grados de libertad, impide que los actuadores puedan alcanzar independientemente todas las posiciones posibles y es necesario establecer las condiciones analíticas que deberá cumplir la posición de cada articulación para ser compatible con la cinemática de la arquitectura mecánica. La interdependencia entre los movimientos de sus articulaciones se define algorítmicamente y es ejecutada por la unidad de control, y los movimientos de cada articulación vienen condicionados por las restricciones mecánicas determinadas por la propia estructura.

Mediante robots paralelos es posible mover la plataforma superior directamente con los seis grados de libertad, con lo que en un solo eslabón cinemático se consigue el posicionado y la orientación del elemento terminal. Este tipo de robots se utilizan tanto para el movimiento de cargas muy pesadas como en robots muy ligeros y de muy reducidas dimensiones, para conseguir en ambos casos muy altas prestaciones en velocidad y aceleración, aunque sea con un alcance muy limitado. Las arquitecturas de robots paralelos que actualmente se consideran arquitecturas clásicas son la Delta y la plataforma Stewart.

La arquitectura de los robots Delta, introducida por Raymond Clavel en 1985, se caracteriza por disponer de cadenas cinemáticas en paralelo y no coplanarias, constituidas por elementos articulados paralelepípedicos. Cada una de estas estructuras está compuesta por dos elementos articulados de igual longitud, unidos por rótulas en sus extremos a otros dos elementos articulados, también de igual longitud. Este paralelogramo ar-

FIG. 7

Planos de desplazamiento de cada estructura paralelepédica

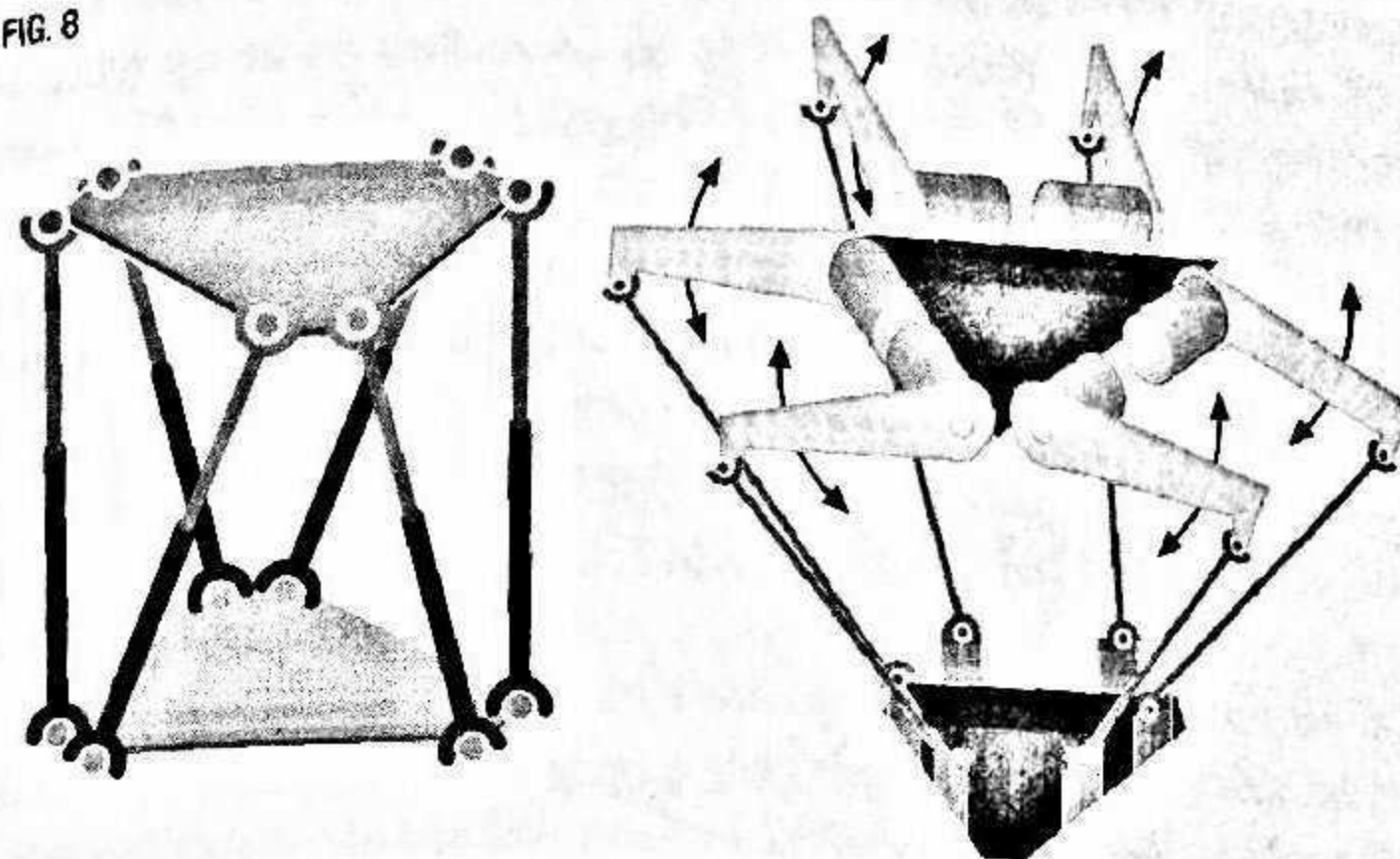


A la izquierda, robot Delta de tres grados de libertad. A la derecha, detalle de la estructura articulada paralelepédica, que garantiza el paralelismo entre el elemento distal y el elemento base, donde R representa el recorrido del elemento distal.

ticulado garantiza el paralelismo entre sus elementos opuestos al variar la posición angular de su estructura (figura 7). En función del número y disposición de sus elementos articulados, los robots Delta pueden ser de tres, cuatro o seis grados de libertad, constituidos respectivamente por tres, cuatro y seis estructuras articuladas.

La plataforma Stewart es una estructura paralela construida en 1954 por el ingeniero Eric Gough, y publicada en 1965, por D. Stewart. Está dotada de seis actuadores lineales articulados mediante rótulas sobre la base y que sustentan, también mediante rótulas, una plataforma móvil (figura 8). Cinemáticamente, esta arquitectura es similar a la estructura Delta de seis grados de libertad, pero en ese caso los seis actuadores no son lineales, sino configurados mediante dos cuerpos unidos por una rotación. El hecho de que en la plataforma Stewart los actuadores lineales estén dispuestos formando tres triángulos y distribuidos circularmente, garantiza que todos los actuadores presenten direccio-

FIG. 8



A la izquierda, estructura de la plataforma Stewart; a la derecha, un robot Delta de seis grados de libertad.

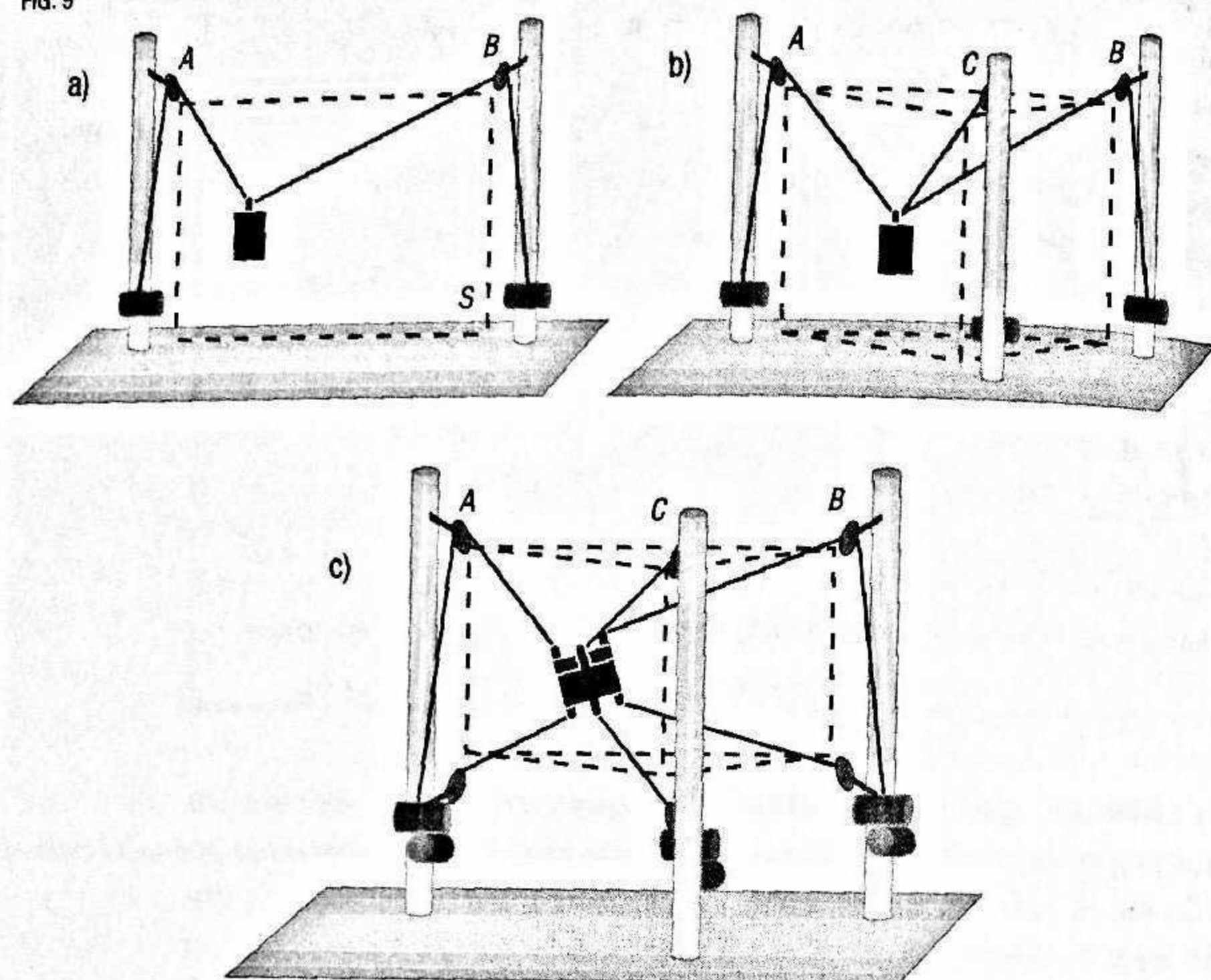
nes distintas, que conjuntamente proporcionan a la estructura los seis grados de libertad.

En estos robots, la relación entre el volumen del espacio de trabajo y el del robot es menor que la de los robots serie, pero si son actuados hidráulicamente pueden soportar cargas y aceleraciones muy elevadas. Este tipo de estructura se emplea para aplicaciones que van desde la realización de pruebas de resistencia a vibraciones hasta el posicionamiento en el espacio de cabinas de simulación de vuelo.

Robots movidos por cables

Para robots que requieren operar en entornos muy extensos, las clásicas estructuras rígidas dan lugar a equipos muy pesados y costosos. Puede conseguirse una estructura mucho más ligera y económica recurriendo a la suspensión mediante cables sujetos a puntos extremos del espacio de trabajo, y que pueden modificar su longitud de forma motorizada (figura 9). En este caso, las dimensiones del espacio de trabajo solo vendrán determina-

FIG. 9



Movimiento de una carga mediante cables en un espacio bidimensional (a), en un espacio tridimensional (b) y en una estructura con seis grados de libertad (c).

das por la longitud de los cables, permitiendo cubrir fácilmente áreas muy extensas.

El posicionamiento del elemento terminal se consigue variando adecuadamente la longitud de cada cable, utilizando en sus extremos tambores de arrollamiento motorizados. Según el número de cables y la arquitectura propuesta, estos sistemas robóticos pueden disponer de hasta seis grados de libertad. Esta técnica ha sido utilizada desde la antigüedad para mover objetos, suspendiendo la carga mediante poleas separadas entre sí.

Si consideramos el caso de un robot movido por cables con dos grados de libertad, es decir, que pueda desplazar una car-

ga sobre un plano, se requieren como mínimo dos grados de libertad. Es el caso de una carga soportada por dos grúas, representado en el esquema a) de la figura 9. Si se añade una nueva grúa no coplanaria con las dos anteriores, se añadirá una nueva dimensión al espacio controlado, como muestra el esquema b). Para conseguir controlar tanto la posición como la orientación (los seis grados de libertad), será necesario disponer como mínimo de seis cables con sus seis actuadores. Estos cables ya no podrán confluir en un punto único de la carga transportada, sino que tendrán que ocupar puntos no alineados, como se observa en el esquema c).

Las estructuras robóticas con cables de seis grados de libertad tienen fuertes limitaciones de rango en las tres orientaciones, como es propio de las arquitecturas paralelas, por ello estos robots generalmente son de tres grados de libertad para el posicionado del elemento terminal. Estas estructuras se han popularizado ampliamente para el posicionado de cámaras volantes en estadios.

Robots humanoides

Los primeros empeños en desarrollar brazos mecánicos que pudieran sustituir a un brazo humano para la realización de ciertas tareas —especialmente las que requieren un mayor esfuerzo físico o una precisión no alcanzable manualmente, o entrañan peligrosidad— y su continua evolución culminaron con el desafío de construir un robot dotado de brazos y piernas, y capacidad de realizar movimientos similares a los de los humanos. Estos robots, los «humanoides», comenzaron a desarrollarse a mediados de la década de 1980, y actualmente ya comienzan a ser operativos.

El reto afrontado en el desarrollo de los robots humanoides, aparte de requerir una estructura mecánica similar a la del cuerpo humano y con unas mismas capacidades de movimientos, es lograr que tengan una apariencia humana y, en lo posible, también un comportamiento inteligente.

Respecto a la apariencia, se han desarrollado robots de aspecto no solo extraordinariamente realista, sino también si-

milar al de personas concretas, como si de dobles se tratara. Estos robots despiertan más interés mediático que práctico. El verdadero logro científico es el de conseguir que lleguen a tener un comportamiento suficientemente inteligente que les permita ser útiles para aplicaciones determinadas.

Creo que los robots solo deberían tener caras si realmente las necesitan.

DONALD NORMAN

En los aspectos cinemáticos, el desarrollo de los robots humanoides ha tenido que afrontar la dificultad del control coordinado de un gran número de grados de libertad. Para emular un brazo humano se precisan siete grados de libertad; cada pierna dispone de otros siete. Para implementar las cuatro extremidades se precisarán, pues, 28 grados de libertad, a los que hay que añadir los dos del tronco y al menos otros dos en el cuello.

El control de una arquitectura dotada de 32 grados de libertad es un caso particular de arquitectura redundante. Los brazos, que ya disponen de un grado de libertad redundante, están soportados por el tronco, que a su vez dispone de otros dos grados de libertad —inclinación y giro del tronco—, soportados a su vez por dos estructuras articuladas —las piernas— que también disponen de un grado de libertad redundante. Por otra parte, las dos piernas, cuando están en contacto con el suelo, constituyen una estructura paralela, con las consiguientes restricciones en su configuración. A esta complejidad cinemática se le añade la necesidad de poder mantener el equilibrio de la arquitectura con la marcha. El desarrollo conseguido en el campo de los procesadores ha permitido disponer de mayores capacidades de cálculo, pero no fue hasta la década de los noventa que se pudo abordar el control de arquitecturas humanoides. A pesar de los esfuerzos dedicados, no se consiguió una apariencia de un robot humanoide ágil hasta principios de este siglo. Hoy en día los robots humanoides consiguen efectuar el paso de forma muy natural e incluso pueden correr a velocidades que alcanzan los 10 km/h, y son capaces de coordinar los movimientos de brazos y manos para realizar diversas tareas.

Las primeras aplicaciones de estos robots estaban orientadas a conseguir un impacto en ferias profesionales y eventos, dispensando folletos o realizando interacciones simples con los visitantes, operaciones en las que no se requería una gran habilidad. El desarrollo de robots humanoides ha permitido conseguir prototipos muy avanzados capaces de realizar tareas más complejas. En el sector industrial el robot humanoide cobra interés por el hecho de poder trabajar con dos manos, lo que resulta útil en operaciones de montaje, en las que, sin embargo, estar dotado de piernas para la locomoción no es una característica relevante. Por eso la mayor parte de robots humanoides para aplicaciones industriales están constituidos por torsos con anatomía humana montados sobre plataformas dotadas de ruedas, que son mucho más eficientes para los desplazamientos sobre superficies planas y uniformes.

También en el campo de los servicios, donde mayor interés tiene este tipo de robots, el desplazamiento suele realizarse sobre superficies muy uniformes y libres de desniveles, por lo que en muchos robots humanoides se sustituyen las piernas por plataformas con ruedas, pero conservando la apariencia humana.

LA UNIDAD DE CONTROL: EL CEREBRO DEL ROBOT

La unidad de control está constituida por el soporte informático necesario que contiene el programa de trabajo para efectuar los cálculos necesarios para descomponer cada tarea en un conjunto de trayectorias y el control de los actuadores para efectuar los movimientos programados. La unidad de control está dotada de las entradas necesarias para la adquisición de datos y señales de diferentes sensores —de presencia, de proximidad, de fuerza o de presión— o señales externas de sincronismo. Igualmente, puede disponer de sistemas de percepción, como la visión por computador o matrices táctiles (piel artificial).

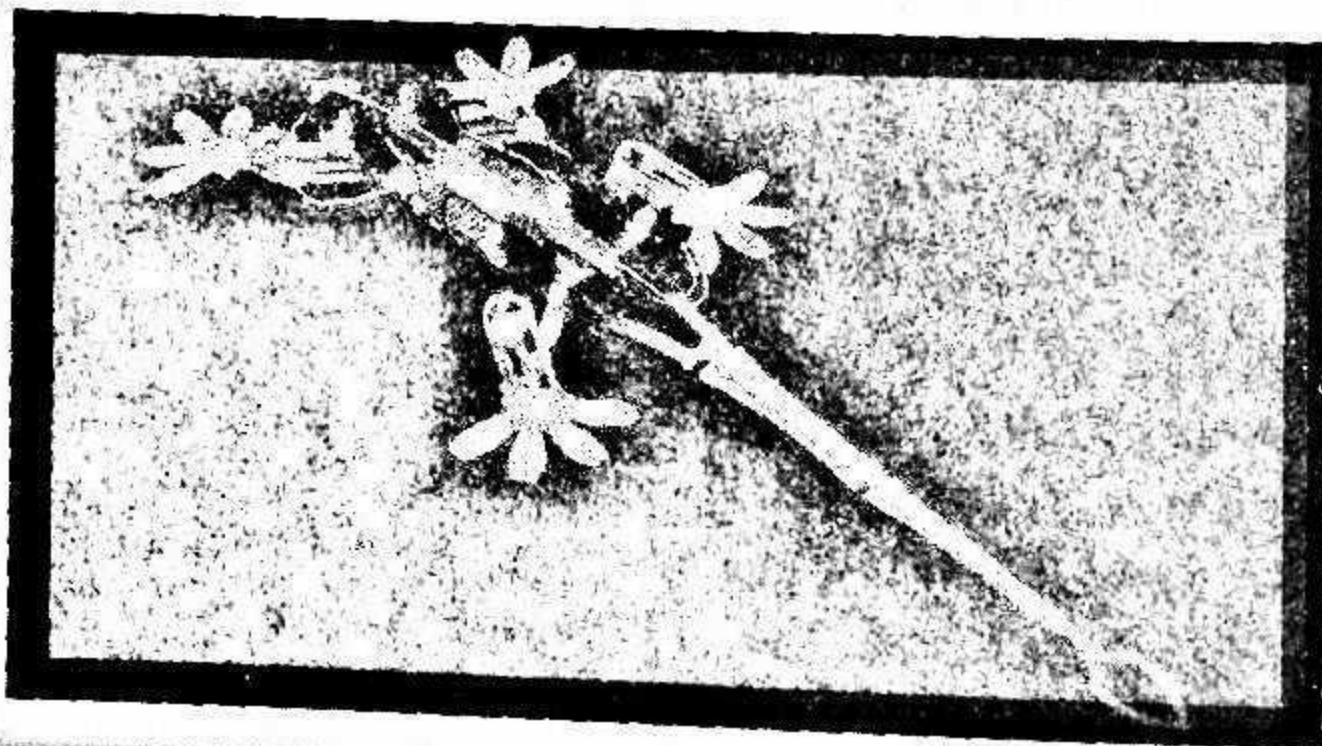
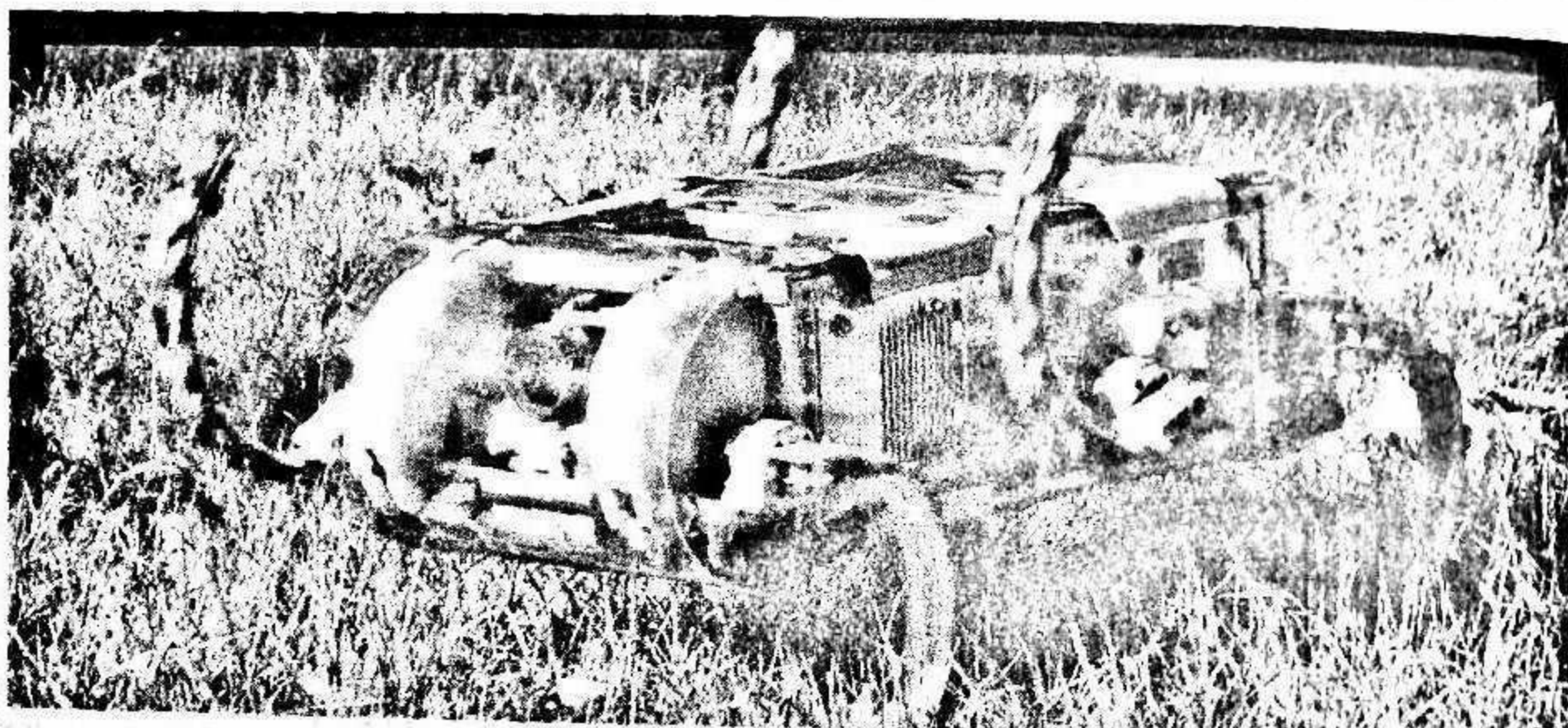
La unidad de control deberá disponer también de la interfaz robot-usuario que permita tanto su programación como la monitorización de la tarea y, en muchos casos, la simulación para en-

LA ROBÓTICA INSPIRADA EN LA BIOLOGÍA

La robótica se inició con el desarrollo de brazos mecánicos equivalentes a los brazos humanos. Esta inspiración en la biología constituye hoy una especialización en auge en el campo de la robótica. El desarrollo tecnológico que la sustenta se produce en dos áreas: en los aspectos físicos de la movilidad y la capacidad de aprehensión y manipulación, y en los aspectos del comportamiento animal.

Arquitecturas inspiradas en la biología

El estudio de la diversidad de locomoción animal ha estimulado a muchos centros de investigación a profundizar en el desarrollo de robots dotados de patas, capaces de vencer obstáculos que resultan insalvables usando vehículos con ruedas. Uno de los estudios más desarrollados se centra en los hexápodos (un grupo de artrópodos que incluye a los insectos), dado que esta arquitectura permite avanzar manteniendo siempre tres patas en contacto con el suelo, lo que resuelve los problemas de estabilidad. Otras capacidades

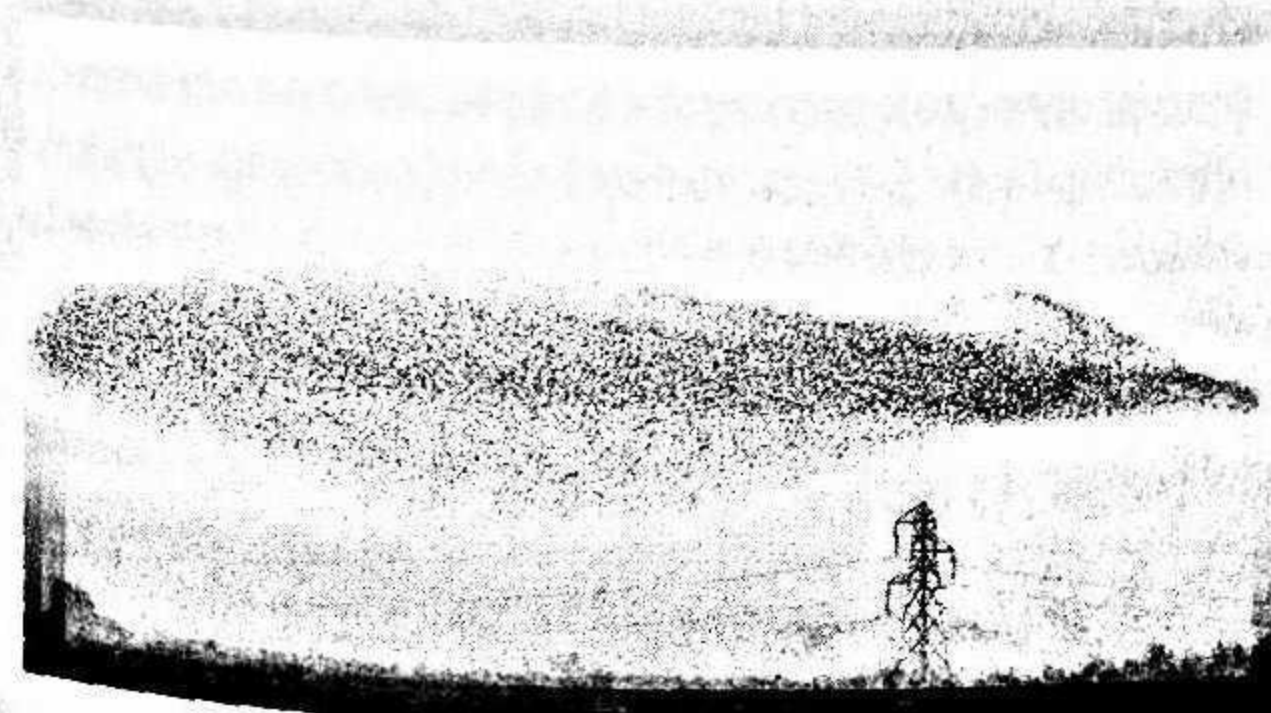


Arriba, RHex, un robot hexápodo experimental desarrollado en la Universidad de Pensilvania. A la izquierda, Stickybot, un robot escalador inspirado en una salamandera y creado en la Universidad de Stanford.

animales han merecido interés, como las de trepar, saltar o volar, habiéndose conseguido diversos prototipos capaces de emularlas. También existen robots submarinos con apariencia de pez y propulsados por aletas, muy útiles para la observación en biología marina. Entre los robots submarinos con apariencia animal se incluye el robot humanoide Ocean One, que nada mediante propulsores y alcanza profundidades de hasta doscientos metros.

Comportamiento cooperativo inspirado en la biología

El desarrollo tecnológico de la robótica inspirado en el comportamiento y la inteligencia animal, individual o de grupo, y la inteligencia distribuida constituye una especialidad que ha progresado apreciablemente en los últimos años. La naturaleza ofrece abundantes muestras de comportamiento inteligente y habilidoso, como la construcción de nidos o las estrategias de camuflaje y de captura, que constituyen objetivos que estimulan la investigación y el progreso tecnológico. La naturaleza también brinda muchos ejemplos para el estudio del comportamiento cooperativo, como la organización del trabajo en insectos como las hormigas o las abejas, la coordinación en vuelo de muchas aves migratorias, o el estudio de la inteligencia distribuida en los comportamientos en enjambres, como las evoluciones de las nubes de estorninos o los bancos de sardinas y otros peces. En todos estos casos se observa que los comportamientos individuales no son aleatorios, sino que obedecen a una estrategia e incluso a una dirección conjunta.



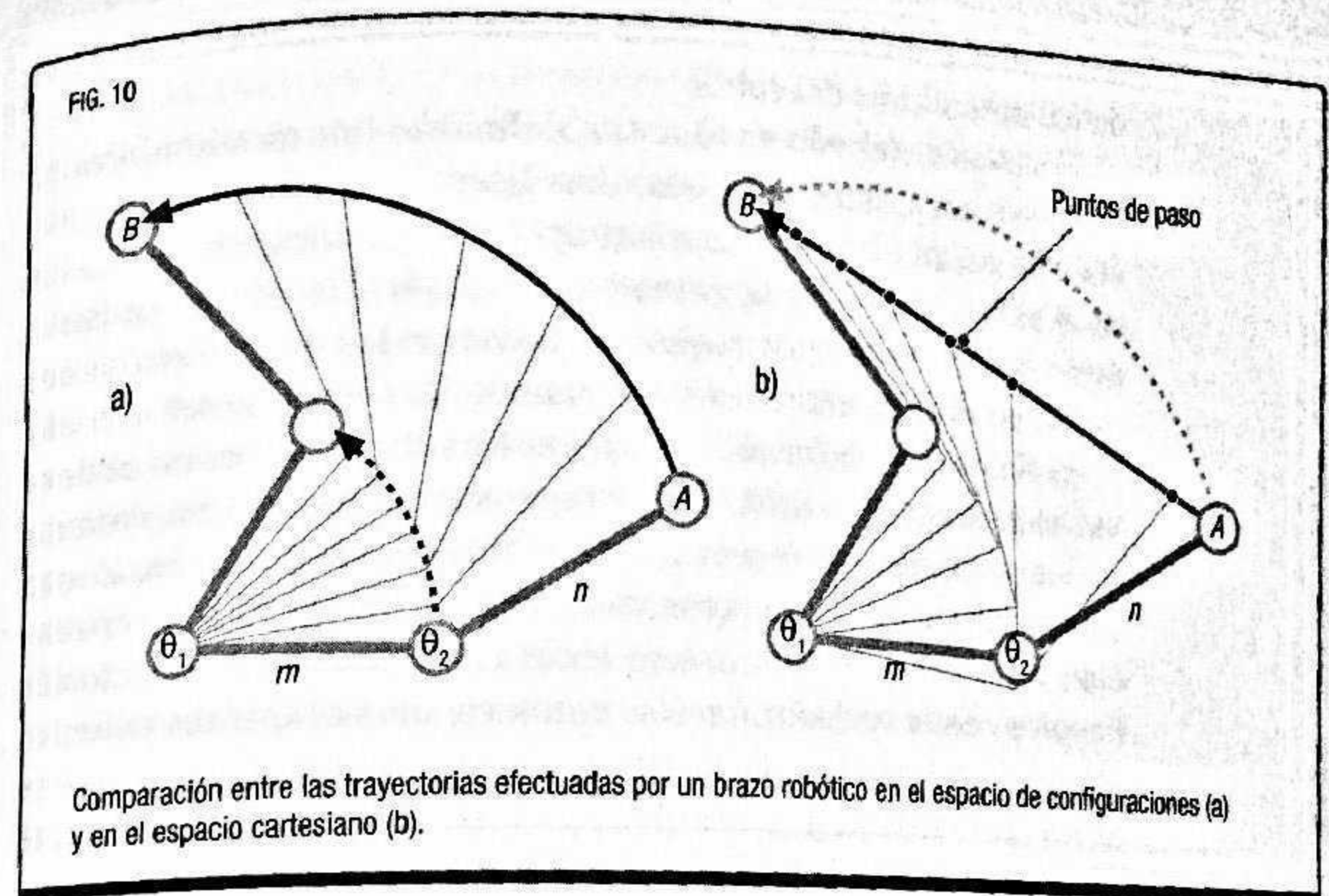
Arriba, SmartBird, una gaviota voladora robótica desarrollada por Festo; con dos metros de envergadura y menos de medio kilo, vuela tanto batiendo las alas como planeando. Abajo, una bandada de estorninos.

sayar estrategias fuera de línea, y poder optimizarlas y validarlas antes de su ejecución.

Control de movimientos

Las trayectorias o acciones que ejecuta un robot se producen como resultado de los movimientos de los elementos articulados que configuran su arquitectura. El sistema de control debe proporcionar a cada actuador que mueve la respectiva articulación la consigna necesaria para que todas ellas, conjuntamente, permitan al robot efectuar las trayectorias deseadas o el posicionado en un punto del espacio y en una orientación determinada. Para ello es preciso considerar dos espacios de trabajo, el *espacio de configuraciones*, cuyas coordenadas son las variables de las articulaciones del robot, y el espacio cartesiano, que es el definido por las coordenadas x, y, z sobre las que se define la posición y orientación del elemento terminal en cada momento.

Para visualizar estos conceptos, la figura 10 muestra un esquema de un brazo robot de dos grados de libertad, formado por dos elementos articulados m y n , y con las articulaciones angulares θ_1 y θ_2 . En este ejemplo, si la trayectoria es el desplazamiento desde un punto A a un punto B , el movimiento realizado se puede efectuar de dos formas distintas. La primera, mediante los movimientos coordinados de m y n , variando simultáneamente las articulaciones θ_1 y θ_2 para alcanzar su posición final en el mismo instante, lo que da lugar a los estados intermedios mostrados en el esquema a) de la figura. En este caso, la trayectoria habría sido programada en el espacio definido por θ_1 y θ_2 , que es el denominado *espacio de configuraciones*. La segunda forma de realizar una trayectoria en el espacio cartesiano, que podría ser una recta, una circunferencia o una curva de ecuación geométrica determinada, fijaría el valor de las variables de control en cada instante (θ_1 y θ_2 en este ejemplo), de forma que la trayectoria entre el punto inicial A y el final B sea definida en el espacio cartesiano. Si esta trayectoria es rectilínea, las configuraciones consecutivas que adquiere el brazo son las que se muestran en el esquema b) de la figura.



La programación de aplicaciones se realiza usualmente en el espacio cartesiano, lo que permite una fácil interpretación por parte del usuario, tanto para ubicar objetos en el entorno de trabajo como para definir una trayectoria o, en general, para programar una tarea determinada. El control del robot, en cambio, deberá realizarse para cada articulación en el espacio de configuraciones, generando las consignas apropiadas para cada uno de sus actuadores. Así pues, será necesario establecer las transformaciones geométricas que relacionan los dos espacios, que serán función de la arquitectura del robot. La función matemática que implementa la transformación necesaria para conocer la posición y orientación del elemento terminal en el espacio cartesiano a partir de la posición de cada articulación recibe el nombre de *transformación cinemática directa*.

Sin embargo, el problema que existe para el control del robot al realizar una trayectoria definida en el espacio cartesiano (coordenadas $X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma$) implicará realizar una *transformación cinemática inversa*. De esta forma se obtienen los valores de las variables articulares ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$), que serán las

consignas, o señales de entrada a los controladores de cada uno de los actuadores del robot.

El control del robot, una vez definidos los movimientos o trayectorias, comporta, pues, dos fases: la transformación de coordenadas, o transformación aplicando la cinemática inversa, y el control de cada actuador para ejecutar el movimiento deseado. Dado que se requiere convertir las coordenadas articulares en coordenadas cartesianas, la complejidad algorítmica de esta transformación dependerá del número de articulaciones angulares del robot, ya que cada rotación implica un giro de los ejes de referencia de la siguiente articulación, lo que analíticamente es de mayor complejidad que la simple traslación de los ejes de referencia en el caso de las articulaciones lineales. Esta transformación conlleva un tiempo de cálculo, que por esta razón será sensiblemente más elevado en robots de coordenadas angulares. El cálculo de los puntos de paso tiene que ser realizado a intervalos de tiempo, el *tiempo de muestreo*, que suele ser de entre 10 y 0,1 ms, según las prestaciones del robot.

Los valores de las variables articulares de cada actuador suministrados en los intervalos de tiempo que exige el cambio de coordenadas constituyen las consignas en posición que debe alcanzar cada articulación del robot después de este intervalo de tiempo. Para cumplir esta consigna, cada actuador dispone de un *servocontrolador*, un dispositivo que, comparando la posición actual con la deseada, calcula la velocidad necesaria de cada actuador y lo controla para que el error sea inferior a un valor predeterminado.

En el caso de los robots diseñados para otras áreas de aplicación no industriales, como los robots móviles, los submarinos o los utilizados en medicina, la unidad de control estará adaptada a cada aplicación, especialmente en lo que se refiere a la capacidad de percepción y a la interfaz con otros equipos y con el usuario. El aumento de la potencia de cálculo de los microprocesadores ha permitido el desarrollo de la robótica en estos campos en que la indefinición del entorno exige una mayor capacidad de percepción y de interpretación.

Control basado en sensores

La unidad de control del robot, además de efectuar el control de tareas y trayectorias, deberá adaptarse al entorno, para sincronizarse, por ejemplo, con la llegada de piezas o con la finalización del trabajo de otra etapa del proceso de producción. En algunas ocasiones la trayectoria no puede ser programada, sino que debe realizarse adaptándose a la tarea en curso. En este caso la casuística es muy variada y puede darse tanto en entornos industriales (soldadura de costuras de formas no preestablecidas, llegada de piezas no ordenadas ni guiadas sobre una cinta transportadora...) como en entornos no industriales (recolección hortofrutícola, cirugía robotizada, asistencia personal, conducción automática...).

Cuando no se pueden programar las trayectorias, es necesario adquirir la información necesaria, ya sea mediante un sensor de proximidad o de fuerza, mediante la visión por computador, o con un escáner láser. Pero tener esa información no garantiza que pueda alcanzarse una capacidad algorítmica suficiente para realizar el guiado fiable mediante sensores o por imágenes. El control basado en sensores será tanto más fiable cuanto más estable resulte la consigna generada por un sistema de percepción.

Un control basado en sensores de fuerza puede ser útil para realizar tareas de mecanizado, como un pulido sobre superficies muy amorfas. La programación de trayectorias de barrido sobre este tipo de superficies para efectuar un pulido uniforme es difícilmente programable. Mediante el sensor de fuerza es posible programar estas trayectorias sin especificar la distancia de trabajo, que resulta crítica, ya que el elemento terminal se posicionará a la cota necesaria y aplicará la fuerza adecuada.

En otros casos esta información no resulta suficiente, y una imagen táctil proporciona los datos complementarios necesarios. Por ejemplo, una superficie táctil en las pinzas del robot permite obtener la orientación del objeto aprehendido y guiar así la posición del elemento terminal para conseguir la realización correcta de la tarea.

Creo que [la conducción autónoma] se va a convertir en algo normal. Igual que un ascensor.

ELON MUSK

En el caso del control de un vehículo autónomo (AGV, del inglés *Automated Guided Vehicle*) en un entorno industrial para el transporte de piezas, resulta útil un guiado que puede ser de dos tipos. El guiado óptico requiere pistas pintadas sobre el pavimento para marcar recorridos. El sistema de percepción correspondiente se basa en sensores fotoeléctricos que visualizan las líneas de

guiado a ambos lados, y servocontrolan la dirección para que el vehículo se ajuste a la trayectoria fijada. La otra opción es el filoguiado, que emplea un hilo conductor alimentado por una señal de radiofrecuencia ubicado bajo el pavimento; el guiado se efectúa me-

diante dos sensores electromagnéticos. En ambos casos, la señal obtenida no requiere procesamiento posterior, por lo que resultará un guiado por sensores fiable y seguro.

Cuando no es posible disponer de infraestructura sobre el entorno, puede utilizarse un sistema de guiado por visión, que tiene la ventaja de poder percibir también obstáculos imprevistos, y trazar y seguir trayectorias libres de obstáculos. Pero estos sistemas de percepción proporcionan un guiado basado en sensores, que requiere cierta capacidad de procesamiento de imágenes, lo que le hace más vulnerable a imprecisiones y errores.

El guiado basado en sensores proporciona gran flexibilidad a la robótica, pero requiere utilizar toda la tecnología disponible para obtener información complementaria y aumentar los índices de fiabilidad a partir de la integración multisensorial. Así pues, un vehículo AGV sin elementos estructurales de guiado podrá disponer de visión por computador, pero complementará la información así obtenida con la de otros sensores, como medidores de distancia láser, sensores de proximidad infrarrojos o sensores ultrasónicos, que permitirán no solo obtener mayor fiabilidad, sino también una mayor capacidad operativa.

Por otra parte, estos vehículos disponen también de sensores en sus ruedas que hacen posible evaluar la distancia recorrida, y de sensores de orientación, como el compás magnético o giroscopios, que proporcionan la orientación del avance. Estas dos

variables permiten ir acumulando vectorialmente los incrementos de desplazamiento, y evaluar continuamente su posición. Esta técnica, denominada odometría, proporciona una posición que con el desplazamiento va acumulando errores, errores que son anulados verificando su coherencia con los sensores del entorno utilizados.

El guiado por sensores ha demostrado sus capacidades con la aparición de los automóviles sin conductor, a lo largo del trayecto realizado en 2015 por el coche Delphi, que recorrió sin incidentes en nueve días los 5400 km que separan Nueva York de San Francisco.

Cuando no es posible realizar la tarea robotizada de forma autónoma se recurre a la teleoperación, la robotización de una tarea que es físicamente realizada por los elementos terminales del robot, pero gobernada por un operador humano a través de una interfaz de mando. La teleoperación permite robotizar tareas complejas aplicando técnicas de inteligencia artificial y guiado a partir de imágenes, como es el caso de la robótica quirúrgica (véase la fotografía inferior de la página 73). Por otra parte, la teleoperación permite trabajar con un factor de escala, de forma que sus movimientos pueden ser reducidos en el entorno real a magnitudes milimétricas o submilimétricas para aumentar la precisión.

FORMAS DE PROGRAMACIÓN

Lo que caracteriza la operatividad del robot no es únicamente su estructura mecánica, sino también su capacidad de control y la forma de programación, que conjuntamente determinarán su fiabilidad, eficiencia y prestaciones.

Para conseguir los objetivos propuestos para cada aplicación, es necesario efectuar una planificación previa del conjunto de tareas que se quieren realizar, la elección de equipos y útiles, y la distribución de esas tareas entre los distintos elementos o equipos que configuran el sistema. Esta planificación debe ser el primer paso en el desarrollo de cada aplicación. Una vez esta-

blecida una propuesta inicial, podrá ya acometerse el trabajo de programación de las distintas acciones que deberá realizar cada equipo, y después de su simulación, revisión y mejora, se dispondrá del conjunto de programas de actuación que consiguen la operatividad de la estrategia preestablecida.

El arte del diseño de una aplicación

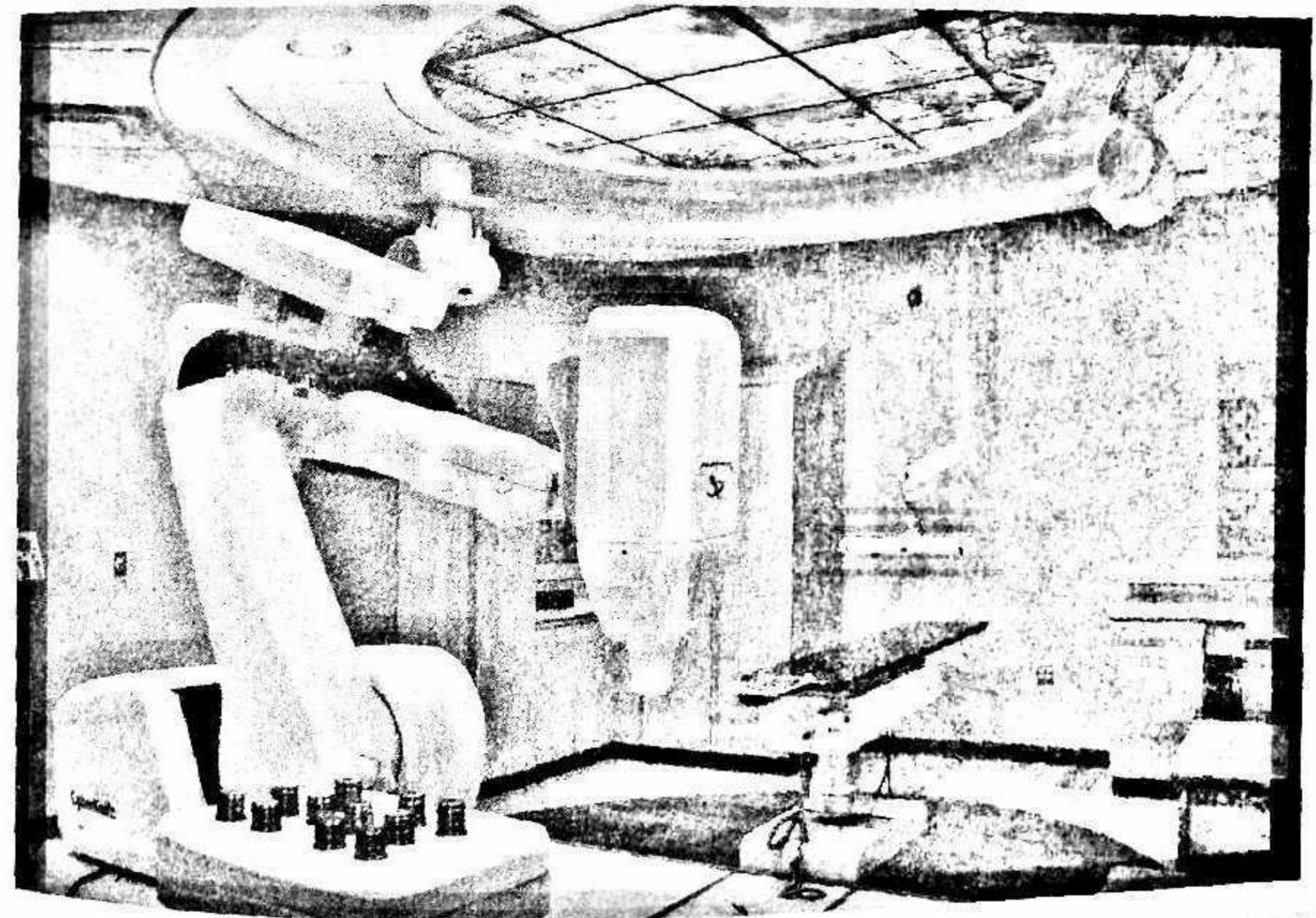
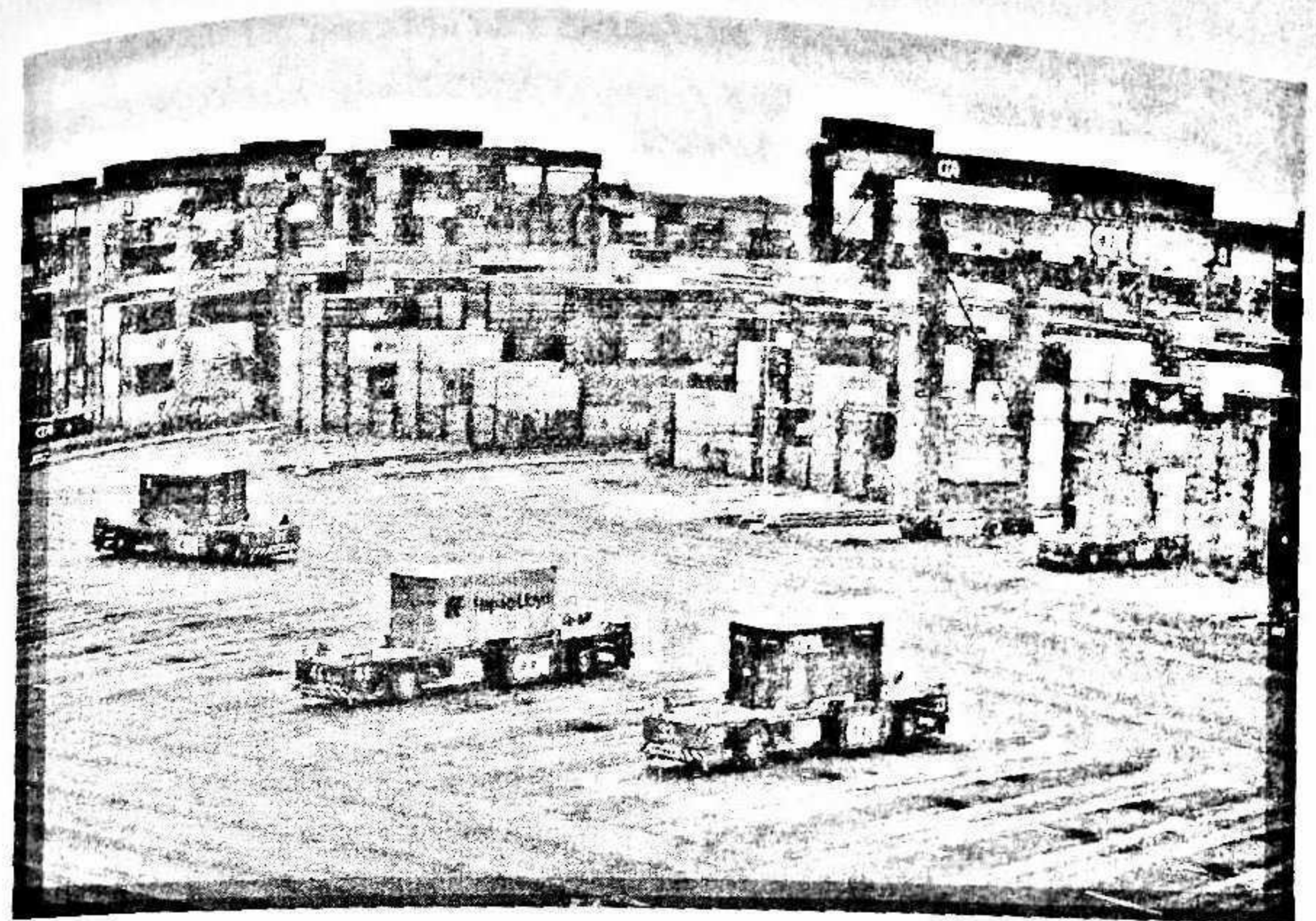
El robot en sí carece de elemento terminal y de la programación necesaria para realizar una tarea. El éxito de la implementación de una aplicación será, pues, la conjunción de múltiples factores, desde la elección del robot y del elemento o los elementos terminales, hasta la definición de los elementos auxiliares del entorno y de la sensorización que resulte necesaria.

La selección del robot comienza por escoger la arquitectura mecánica más apropiada para realizar eficazmente las tareas asignadas. La elección del elemento terminal constituye en algunos casos el factor determinante para garantizar la fiabilidad y la eficacia en la realización de una tarea, y exige en muchos casos un diseño específico.

Para facilitar la realización de la tarea pueden utilizarse dispositivos auxiliares, tales como posicionadores, orientadores, separadores o clasificadores de piezas, de forma que el robot pueda efectuar la tarea de la forma más rápida y fiable posible.

Para que el robot realice la tarea de forma inteligente (por ejemplo, que pueda aprehender una pieza en movimiento, o que no realice ciclos en vacío por ausencia o caída de la pieza, o que no se produzcan operaciones erróneas), deberá disponer de sensores o sistemas de percepción adecuados en el entorno que le permitan detectar situaciones anómalas.

El diseño de la aplicación debe tener en cuenta este conjunto de factores, lo que constituye más un arte que una ciencia. La correcta elección de todos los elementos complementarios que configuran la robotización de la tarea será tanto o más importante que la elección del propio robot, y tiene por objetivo, por una parte, simplificar el programa del robot, mini-



Arriba, vehículos de guiado automático transportan contenedores en el puerto de Hamburgo (Alemania). Debajo, el sistema de radiocirugía robótica CyberKnife, un excelente ejemplo de buen diseño y de gran eficacia médica.

mizando el número de alternativas de actuación introducidas para cada situación prevista en función de la casuística esperada. Por otra parte, la simplificación de la tarea conllevará un menor tiempo de ciclo de trabajo y una menor probabilidad de error.

El arte del buen diseño implica, en primer lugar, una valoración acertada de la tecnología que se va utilizar, siendo aconsejable tener en cuenta que lo simple es lo eficaz. Así, por ejemplo, la correcta selección de la pieza que sale del alimentador puede llevarse a cabo mediante un sistema de visión por computador o también disponiendo de una o más células fotoeléctricas dispuestas estratégicamente, lo que sin duda resultará más económico y fiable. También es aconsejable confiar en los principios físicos más que en los tecnológicos. Por ejemplo, para que unos tornillos queden posicionados correctamente será preferible recurrir a un dispositivo por gravedad, teniendo en cuenta que su cabeza pesa más que la rosca, que utilizar un sistema electromecánico de giro basado en sensores.

El arte del buen diseño implica también anticipar acontecimientos, diseñando cada estación de trabajo teniendo en cuenta las necesidades actuales pero con flexibilidad suficiente para asumir correcciones y modificaciones que puedan introducirse más adelante.

Por otra parte, el buen diseño también incluye aspectos no funcionales pero que afectan a la capacidad de supervisión. Siempre que sea posible, los elementos auxiliares introducidos en el entorno del robot no deberán impedir la visualización del progreso de la tarea y mantener una accesibilidad suficiente, especialmente en las fases más susceptibles a requerir ajustes o verificaciones, facilitando así las tareas de mantenimiento.

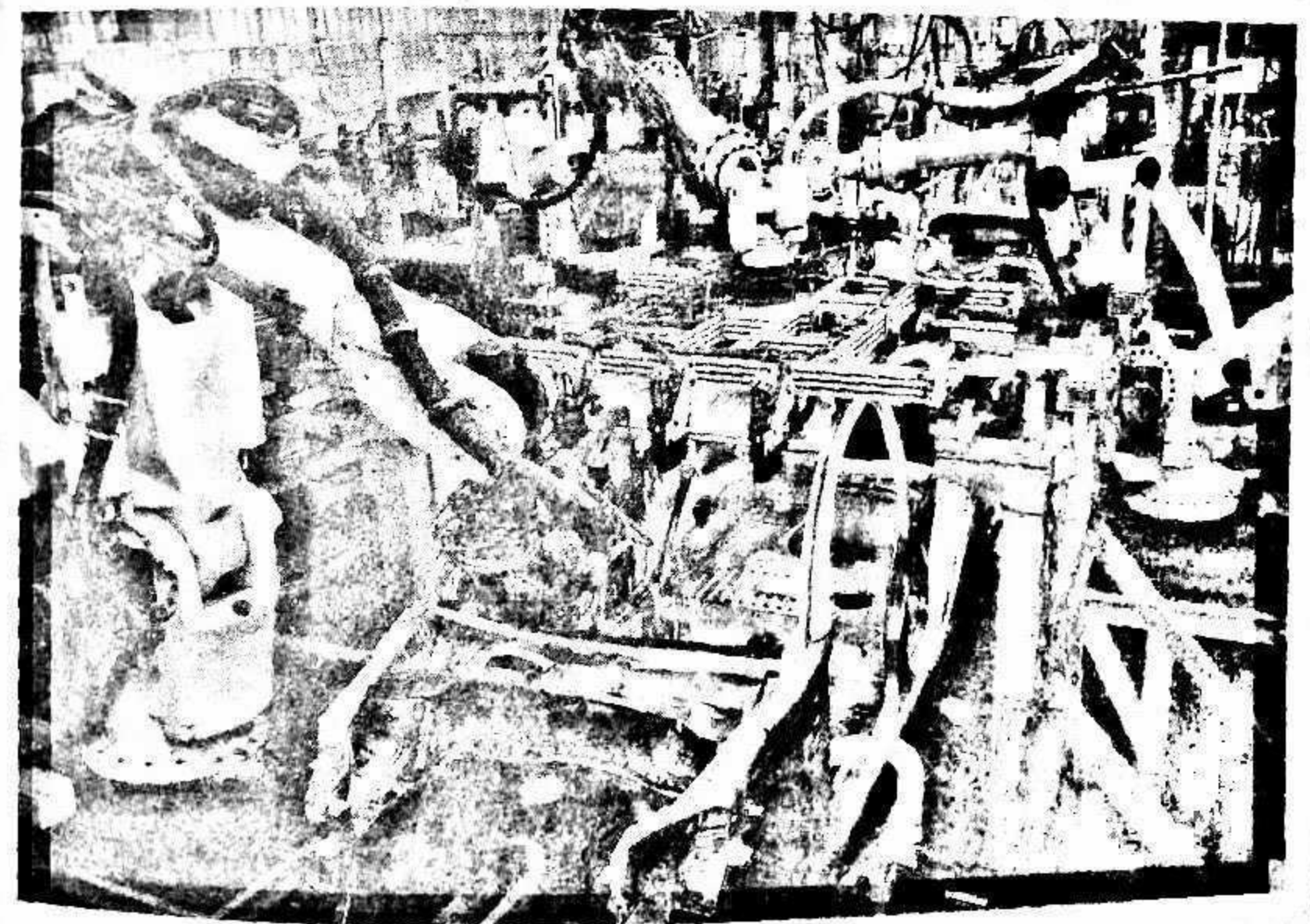
Por último, la sensorización no debe orientarse solo a permitir la realización fiable de la tarea, sino que también deberá proporcionar toda la información necesaria del proceso para poder hacer uso del tratamiento masivo de la información (*big data*), lo que conllevará una mejor capacidad de seguimiento y de optimización.

REDUNDANCIA Y TOLERANCIA A FALLOS

Un sistema robotizado debe garantizar una operatividad elevada para rentabilizar su coste. La fiabilidad de un robot puede expresarse en términos de su disponibilidad. Una disponibilidad del 97 % se traduce en 354 días de trabajo al año y 11 días de reparación o mantenimiento, lo que puede considerarse aceptable. Sin embargo, una instalación de soldadura con ocho robots a cada lado de la carrocería requiere que todos funcionen simultáneamente. La disponibilidad del conjunto será $(0,97)^{16} = 0,61$, es decir, durante casi cinco meses al año alguno de los robots estará en mantenimiento.

Programar anticipándose a los fallos

La programación de las tareas en robótica debe tener en cuenta la redundancia para conseguir una tolerancia frente a fallos. Un modo de lograrlo es disponer de robots adicionales para sustituir los que fallen. Esa sustitución requiere un tiempo que puede evitarse si el planificador efectúa no solo un plan de acción para cada robot, sino también 16 planes adicionales para realizar las tareas con un robot menos. Así, la retirada de un robot no produce interrupciones, pues la detección del fallo provoca rápidamente un cambio de los programas de los robots, conectados en red. En los sistemas multirrobot, la redundancia no consiste en tener robots de reserva inactivos, sino en mantener todos los robots funcionando a unos ritmos que puedan incrementarse si se retira alguno, y mantener así la cadencia de trabajo.



Soldadura de carrocerías mediante brazos robóticos en una planta de fabricación de automóviles.

La planificación

La planificación es el proceso de generar y proporcionar las especificaciones del conjunto de tareas que configuran una aplicación determinada, para que sean ejecutadas ya sea por un robot o por un conjunto de ellos.

Para realizar la planificación será necesario disponer, por una parte, de una información de base consistente en el CAD del entorno, que es la descripción física completa de todos los elementos que configuran el espacio de trabajo en un soporte informático estándar procesable por el ordenador. Por otra parte, el planificador habrá de conocer con detalle la cinemática, la forma y las dimensiones de los robots que configuran la estación de trabajo, datos que suele suministrar el fabricante. Toda esta información permitirá modelar y simular la estación de trabajo.

El planificador, después de generar y proporcionar las especificaciones del conjunto de tareas que configuran una aplicación, convertirá los objetivos genéricos en trayectorias y acciones compatibles con la cinemática de los robots y con las condiciones del entorno.

Programación de trayectorias

Para generar las trayectorias, el planificador efectuará primero la búsqueda de los caminos que permiten pasar entre puntos de origen y de destino en cada fase de la tarea y después seleccionará el óptimo. A continuación, analizará en cada trayectoria la proximidad a los *puntos singulares*, que son los puntos del espacio de trabajo en que alguna de las articulaciones alcanza un final de recorrido, o se presenta una coincidencia de ejes en distintas articulaciones, lo que supone limitaciones diversas.

Con estos condicionantes, el planificador genera un conjunto de trayectorias para realizar su evaluación. El evaluador elige la trayectoria óptima de minimización de una función coste según criterios dados, como el tiempo de ejecución, la distancia a singularidades y las distancias a obstáculos del entorno.

El programa de ejecución de una tarea estará constituido por la secuencia de movimientos y acciones que se precisen, tales como avanzar, abrir-cerrar pinza, activar utensilio, etc. Estos pueden haber sido generados por un planificador de tareas, o pueden programarse manualmente para realizar una operación o para realizar una tarea dentro de una operación.

Se pueden distinguir dos formas básicas de programación de trayectorias o de posicionado de un robot: programación textual y programación por guiado.

En la programación textual, el robot se programa a partir de una secuencia de instrucciones que definen parámetros tales como: posición, trayectoria geométrica determinada, velocidad, aceleración, tiempo de espera, o abrir-cerrar. En esta programación, expresada por coordenadas, el robot se puede guiar desde la botonera de mando, mediante teclas o un *joystick*. Los movimientos pueden definirse bien articulación a articulación, bien en el espacio cartesiano, fijando puntos de paso o determinando trayectorias con una geometría definida. De esta forma se posiciona el robot en cualquier punto del espacio. Si se han definido puntos de origen y destino de una trayectoria, el robot podrá calcular el camino con movimientos coordinados —realizados de forma simultánea por todas las articulaciones para alcanzar la posición final— o podrá calcular una trayectoria rectilínea entre estos dos puntos.

Para evitar colisiones, deberá programarse una trayectoria entre el origen y el destino, y añadir los puntos de paso seguros que sean necesarios, definiendo así trayectorias poligonales, que la unidad de control del robot podrá suavizar estableciendo curvaturas en cada vértice. La programación de trayectorias también requiere especificar aceleraciones y velocidades para generar trayectorias con movimientos suaves y continuos, a fin de evitar sobreesfuerzos innecesarios y riesgos de caída de pieza del elemento terminal, así como de reducir las necesidades de mantenimiento del robot.

La programación articulación a articulación tiene la ventaja de poder ser ejecutada por el robot de forma más rápida y eficiente, ya que su unidad de control no realizará las operaciones

algorítmicas necesarias para efectuar el movimiento coordinado de varios ejes simultáneamente.

Una programación de movimientos en coordenadas del espacio cartesiano —en X , Y , Z para posicionar el elemento terminal, y en α , β , γ para definir su orientación— es más intuitiva y facilita la tarea de programación manual. La ejecución de estas trayectorias puede visualizarse en la pantalla, realizando la simulación de los movimientos del robot, lo que permite verificar la programación y efectuar las correcciones necesarias en este entorno virtual. Actualmente estos simuladores poseen una gran potencia de cálculo, lo que unido a los procesadores gráficos de que dispone la unidad de control, permite la simulación realista del entorno robotizado.

En la programación por guiado se efectúa manualmente la tarea, memorizando las trayectorias realizadas en la fase de aprendizaje para que puedan ser replicadas en la posterior fase operativa, sin precisar una programación explícita. Esta forma de programación se utiliza cuando la pericia del operario, por la habilidad que requiere la tarea, es difícil de expresar analíticamente. En la primera fase, la fase de aprendizaje, se puede utilizar como modelo la tarea realizada por un operario muy experto, que incluso puede mejorar sus habituales capacidades editando la tarea de aprendizaje realizada. Ello permite confeccionar un programa por yuxtaposición por tramos, eligiendo en cada parte la mejor ejecución de las operaciones efectuadas repetidamente en la fase de aprendizaje. Este aprendizaje puede llevarse a cabo moviendo físicamente el robot sobre una determinada trayectoria, mediante un guiado manual, disponiendo de una empuñadura sensorizada adecuada.

Con este tipo de programación se pueden realizar tareas difícilmente programables geométricamente, como un cordón de soldadura sobre una superficie irregular o programar trayectorias de pintado de forma natural, intuitiva y ágil. También permite definir de forma más cómoda puntos de origen y destino en manipulación.

Si en la programación por guiado se utiliza el propio robot, se denomina programación en línea (*on-line*), pero este no pue-

de estar productivo en este periodo de aprendizaje. También es posible la programación por guiado gestual utilizando un robot de programación específico pasivo —sin actuadores— instalado fuera de la línea de producción, que permitirá realizar de forma libre y con menos obstáculos las trayectorias deseadas, que también podrán ser memorizadas por la unidad de control y posteriormente ejecutadas por el robot operativo, lo que constituirá la programación fuera de línea (*off-line*).

Existen otras posibilidades de programación gestual que no requieren dispositivos físicos para efectuar el guiado. Esta técnica, denominada programación por demostración, requerirá un sistema de visión que interprete los movimientos y acciones que realiza el operador, que convertidos en trayectorias del elemento terminal constituirán el programa.

El sistema de visión deberá efectuar la reconstrucción tridimensional del operador y sus manos con la resolución suficiente para poder programar la aplicación deseada. Esta forma de programación es de especial interés en robots redundantes, en los que el posicionado del elemento terminal admite múltiples configuraciones del resto del cuerpo del robot, lo que dificulta la programación textual. Esta situación también se produce en la programación de tareas para un robot humanoide, en la que se requiere definir tanto la trayectoria de las manos o pies como la configuración del cuerpo (postura). La programación por demostración permite adquirir tanto las trayectorias como la configuración durante la ejecución de toda la tarea.

La implantación de la robótica

Las primeras aplicaciones de la robótica en la industria constituyeron la plataforma que impulsó su progresivo desarrollo y su expansión a otros campos y sectores. Para ello hubo que adaptar los robots para cada aplicación, tanto en su estructura mecánica, como en los aspectos de control.

La evolución y la implantación de la robótica constituyen un nuevo capítulo, muy reciente todavía, dentro de la historia general de la tecnología. Cuando se inició la década de 1970, el número de robots que existían en todo el mundo no llegaba a mil; solo quince años más tarde esta cifra se había multiplicado por cien, y desde entonces no ha cesado de aumentar.

La expansión de la robótica ha seguido una vía paralela a la del progreso de la informática, disciplina que forma uno de los pilares fundamentales de su desarrollo. Los primeros robots eran industriales y fueron concebidos para realizar tareas difíciles o imposibles de llevar a cabo manualmente. Más tarde, las expectativas y los objetivos se ampliaron: comenzaron a desarrollarse robots para algunos usos no industriales, y también otros capaces de operar en medios acuáticos y aéreos.

Una visión general de este breve e intenso proceso de expansión proporciona algunos conocimientos sobre la historia de la tecnología, y además permite constatar cómo ha sido posible llegar a conseguir retos de índole muy diversa, que abarcan no solo problemas industriales, sino también otros relacionados

con actividades tan fascinantes como la arqueología submarina o la exploración espacial.

RETOS E HITOS DE LA ROBÓTICA

El primer robot industrial se instaló en 1961 en la fábrica de coches de General Motors en Nueva Jersey. Se trataba del robot Unimate, de la empresa Unimation, fundada unos años antes por Joseph Engelberger y George Devol, un ingeniero que en 1954 había patentado un brazo mecánico que operaba automáticamente. Este primer robot era movido hidráulicamente, lo que aseguraba alcanzar, con la tecnología disponible, una mejor capacidad de control tanto en posición como en velocidad y fuerza.

Los primeros robots industriales se utilizaron especialmente para la carga y la descarga de prensas; el movimiento de bloques de hierro candente y las correspondientes piezas de hierro conformadas, una tarea que no podía realizarse de forma manual; la soldadura por puntos, que requiere el movimiento de unas pesadas pinzas, y la pintura, para evitar la inhalación de atmósferas irrespirables.

Pocos años más tarde surgió un primer intento de aplicar la robótica a usos no industriales. Concretamente, en 1963 se desarrolló en Rancho Los Amigos, un hospital de veteranos de guerra en Downey, California, un brazo robótico concebido para asistir a un amputado en algunas tareas de su vida diaria.

En el Instituto de Investigación de Stanford (SRI), también en California, se desarrolló entre 1966 y 1972 el Shakey, el primer robot móvil capaz de desplazarse por un entorno con obstáculos y sin chocar, gracias a que estaba dotado de sensores y era capaz de planificar sus movimientos. Este prototipo está considerado como el primer robot dotado de inteligencia artificial.

Durante esta primera etapa, la introducción de la robótica en la industria se desarrollaba en Estados Unidos básicamente a cargo de las empresas Unimation y Cincinnati-Milacron, y así fue hasta entrada la década de 1970. En Europa la fabricación

de robots comenzó a partir de 1973. Entre los robots europeos destacan los suecos ASEA, con sus modelos IRB6, para cargas de hasta 6 kg y orientado a la manipulación, e IRB60, para cargas de hasta 60 kg, muy utilizado para soldadura y paletización, que consiguieron una amplia cuota de mercado en el mundo. También cabe mencionar los robots alemanes KUKA, para soldadura y manipulación; los italianos Comau, y los noruegos Trallfa, para pintura. Los fabricantes de coches, como Renault, Citroën, Volkswagen o Fiat, fabricaron sus propios robots para sus plantas de producción.

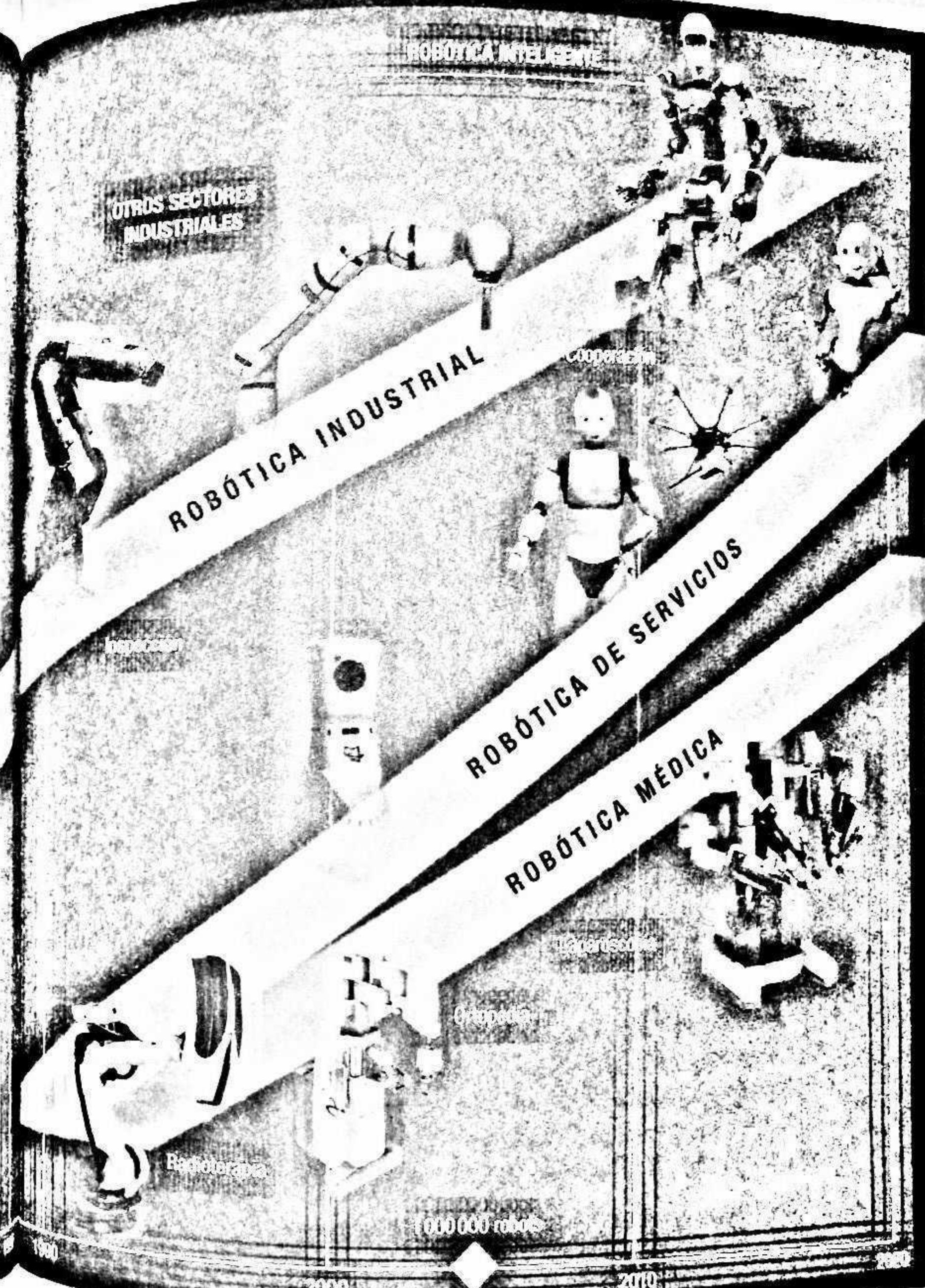
Un hecho muy relevante en la historia de la robotización tuvo lugar en 1968, cuando Unimation cedió la licencia para fabricar su robot en Japón a la compañía Kawasaki. A partir de entonces, Japón comenzó a desarrollar su propia industria, consiguiendo en pocos años liderar la fabricación mundial de robots industriales.

La robótica submarina

También en 1968 acaeció otro hecho que tuvo una gran influencia para el desarrollo de la robótica. El 8 de marzo se hundió en el Pacífico el submarino soviético K-129, que estaba dotado de misiles estratégicos con cabezal nuclear. En plena Guerra Fría, los soviéticos, que tenían un gran interés en seguir manteniendo su tecnología como materia muy reservada, confiaron en el desarrollo de un robot submarino como única vía para lograr su recuperación, y evitar así que pudiera caer en manos de los estadounidenses.

La Unión Soviética desplegó muchos medios aéreos y navales para tratar de localizar el submarino perdido. Esta actividad fue detectada por los servicios secretos estadounidenses, que interpretaron acertadamente que estaba motivada por la pérdida de un submarino soviético. Ello provocó el lanzamiento por parte de Estados Unidos de un programa específico para localizarlo y recuperarlo. Su localización se consiguió analizando los registros acústicos de diferentes centros de escucha en el océano

Desde la instalación de un primer robot en una planta de fabricación de automóviles en 1961 hasta la actualidad, la robótica ha experimentado una gran expansión, primero en la industria manufacturera y actualmente en todos los sectores industriales. Este progreso tecnológico ha sido posible gracias a los avances del binomio microelectrónica-informática, que constituye el cerebro pensante de la robótica. Ello ha permitido abordar nuevos campos de aplicación en los que las tareas requieren mayor capacidad de control basada en sensores y más inteligencia. En los próximos años, esta expansión se producirá especialmente en el sector de los servicios, tanto en el ámbito público como en el doméstico, facilitando la realización de muchas tareas cotidianas.



Pacífico, y por triangulación de sonidos considerados anómalos. Una vez ubicado y fotografiado el submarino —a 2500 km de Hawái y a 4900 m de profundidad—, se encargó a la CIA la misión de recuperarlo para poder analizar los misiles con cabezal nuclear de que estaba dotado.

Para ello, entre 1970 y 1972 se desarrolló el proyecto Azorian, consistente en la construcción de un barco laboratorio, el Hughes Glomar Explorer, dotado de todo tipo de instrumentación, robots submarinos capaces de operar en aguas profundas y una potente grúa elevadora para izar el submarino. Para poder realizar estos trabajos de forma discreta, formalmente se dio a esta misión un carácter civil: la búsqueda y explotación de unas supuestas reservas de manganeso en este fondo submarino. El proyecto culminó con un éxito relativo, ya que el submarino se pudo sujetar con las pinzas del sistema de elevación diseñado, pero durante el izado se partió y solo un tercio de la proa del casco llegó al compartimento de carga que se había dispuesto en la parte inferior del buque.

Paralelamente, la pérdida del submarino provocó un fuerte impulso en la investigación en robótica submarina por parte de la Unión Soviética. Sin embargo, la tecnología desarrollada no pudo aplicarse para esta misión, dado que no pudieron localizar el submarino, ni sospecharon el objetivo real encubierto por la prospección estadounidense de esos supuestos yacimientos de manganeso.

La recuperación del submarino por parte de los americanos, aunque fue parcial, constituyó un éxito, dado que contenía los misiles buscados, y la divulgación de este proyecto en 1975 supuso un revulsivo que dio un fuerte impulso al desarrollo de la robótica submarina, tanto para posibles aplicaciones militares, como para facilitar la prospección y extracción de petróleo de yacimientos en plataformas marinas.

Más tarde, otros logros pusieron de relieve la eficacia conseguida en el campo de la robótica submarina, como fue el caso del robot Scarab, que en 1985 se utilizó para recuperar las cajas negras de un avión de la compañía Air India que se precipitó en el mar debido a un atentado con bomba en pleno vuelo, quedando sus restos a 2000 m de profundidad.

En el mismo año, el robot submarino Argo localizó los restos del Titanic, el célebre transatlántico británico hundido en el océano Atlántico Norte en 1912 en su viaje inaugural. El casco fue localizado a unos 3800 m de profundidad, separado en dos partes. Este hallazgo despertó un gran interés, que motivó que se organizaran otras expediciones posteriores, como la que se llevó a cabo en 1986 utilizando el robot Alvin, de la Woods Hole Oceanographic Institution (véase la fotografía superior de la página 91). Esta vez se trataba de un robot submarino tripulado por tres personas. El robot Alvin consiguió efectuar una completa exploración de los restos, que se encuentran esparcidos en un amplio campo de varios kilómetros cuadrados. El impacto mediático que despertaron las imágenes motivaron posteriores misiones para efectuar el rescate de miles de objetos del barco, que hoy se exponen en numerosos museos.

También tuvo un gran impacto el hundimiento del petrolero Prestige en el año 2002 en aguas españolas, concretamente en Galicia, y la posterior utilización de la robótica para paliar los efectos del vertido que provocó. El buque estaba cargado con unas ochenta mil toneladas de fuel y se hundió después de partirse, produciendo un gran derrame que provocó una marea negra en las costas gallegas. Después del hundimiento, las dos mitades quedaron en el fondo marino con unas quince mil toneladas de fuel en su interior, que seguía fluyendo hacia la superficie prolongando los efectos de la marea negra. Para vaciar los tanques fue necesario perforar el casco y bombear el fuel hacia unas bolsas especialmente diseñadas para poder ser izadas hasta la superficie, una operación que fue realizada con éxito mediante tres robots submarinos en 2004.

Más recientemente, el Ocean One, un robot submarino humanoide controlado de forma remota desarrollado por la Universidad de Stanford, permitió localizar en 2016 el buque insignia del rey francés Luis XIV, que naufragó en 1564, hundido a cien metros de profundidad a veinte millas de Toulon, al sur de Francia. El robot, con dos brazos completamente articulados y visión estereoscópica, además de localizar el ilustre pecio recuperó objetos de considerable valor arqueológico.

Los robots aéreos

Los robots aéreos han alcanzado un gran desarrollo en los últimos años, pero sus antecedentes se remontan a la Primera Guerra Mundial (1914-1918), cuando se desarrolló en el Reino Unido el Aerial Target, un avión no tripulado guiado por radio.

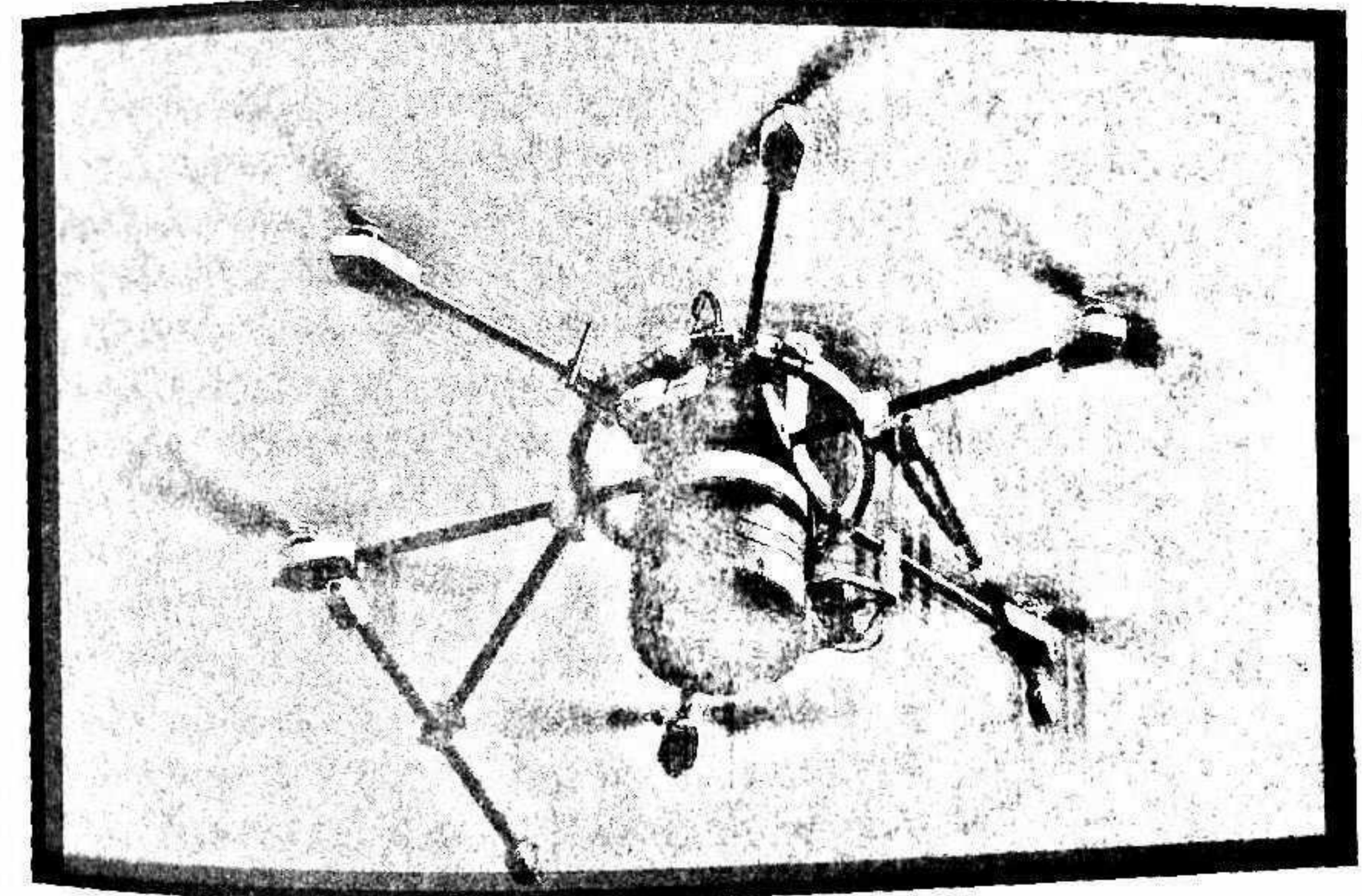
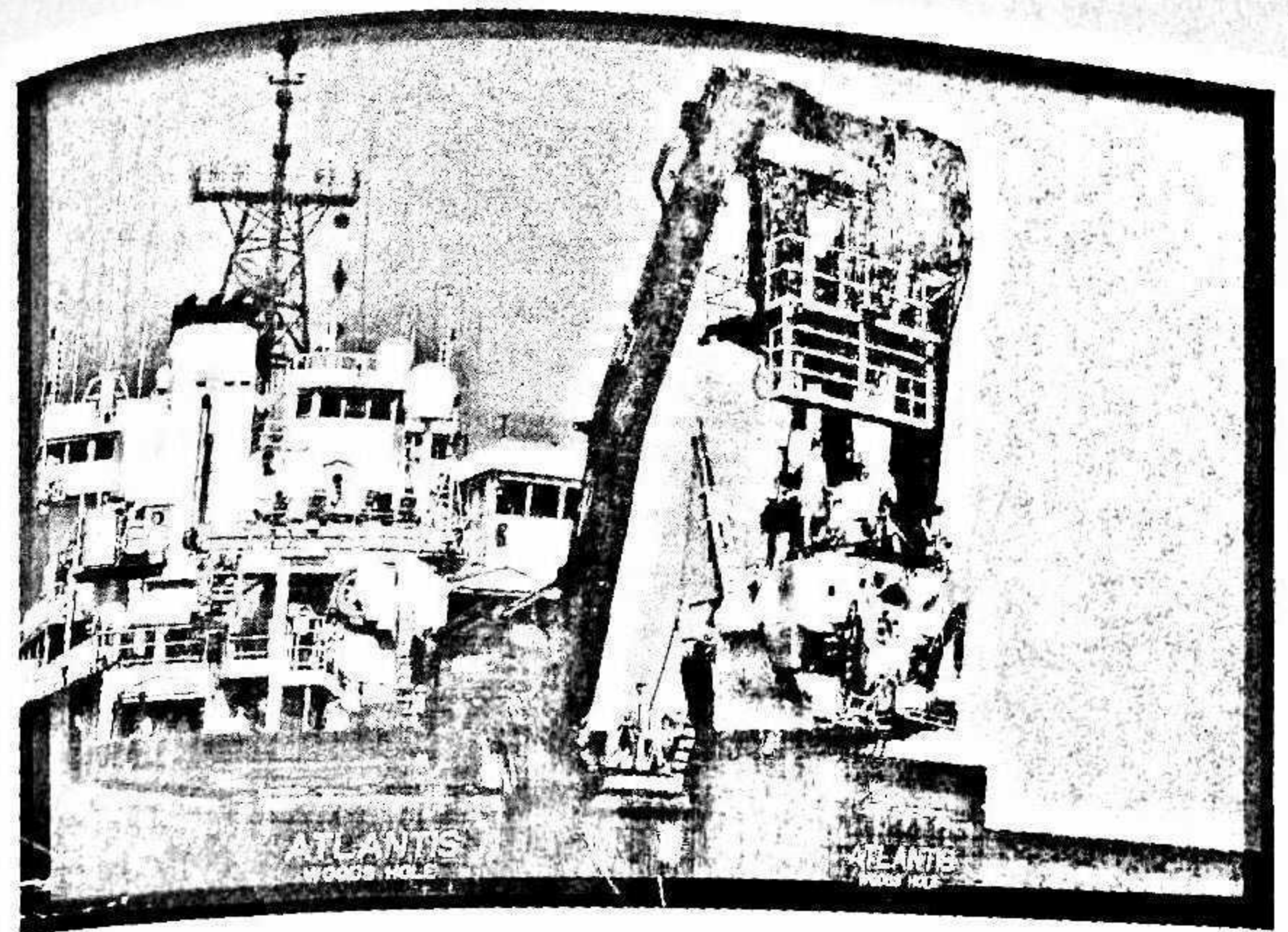
En 1917 la armada estadounidense desarrolló el Kettering Bug, concebido como un torpedo aéreo, consistente en una avioneta no tripulada, controlada por radio, con una capacidad de carga de 80 kg, que podía navegar de forma autónoma utilizando un giroscopio para la orientación y un sensor aneroide como barómetro altimétrico.

Estos primeros desarrollos son los antecedentes de los actuales vehículos aéreos no tripulados (UAV, de *Unmanned Aerial Vehicle*), muy utilizados en el ámbito militar a partir de la guerra del Golfo (1990-1991). Actualmente se utilizan también en muchas aplicaciones civiles, como el control de incendios forestales, la evaluación del rendimiento de explotaciones agrarias, el seguimiento de plagas, la planificación urbanística, el mantenimiento de líneas eléctricas aéreas o la evaluación de daños en caso de grandes desastres.

Actualmente se han popularizado los drones, robots aéreos caracterizados por su pequeña envergadura, propulsión eléctrica mediante baterías recargables y su facilidad de uso. Estos dispositivos resultan muy útiles para la exploración aérea, y en un futuro muy próximo lo serán también para el transporte de cargas ligeras a cortas distancias (véase el dron repartidor de la fotografía de la página contigua).

La robótica en la exploración espacial

La utilización de la robótica en la exploración del espacio también provocó en su momento un gran impacto mediático por sus posibilidades. El primer hito en este campo lo alcanzó la Unión Soviética, que desarrolló el programa Lunik para la exploración lunar. Este programa se inició en 1959 con el Lunik-I, una cápsula



Arriba, el robot Alvin es preparado para una inmersión para un estudio de montes submarinos en 2004. Abajo, un dron repartidor de la compañía Connect Robotics, que en 2016 hizo el primer reparto de comida con dron, en Portugal, en colaboración con un comedor social.

que pasó por las proximidades de la Luna antes de entrar en órbita solar. Una década más tarde, en 1970, la misión Lunik-17 logró depositar sobre la superficie lunar el robot explorador Lunokhod 1, un vehículo con ocho ruedas y un peso de 750 kg, que logró recorrer 10,5 km durante los once meses que estuvo operativo.

Ya en los años noventa, exactamente en 1996, la NASA llevó a cabo el lanzamiento del módulo Mars Pathfinder, que se posó sobre Marte en julio de 1997 transportando el pequeño robot Sojourner, de tan solo 11,5 kg. Este robot, dotado de seis ruedas, era capaz de avanzar a una velocidad de 1 cm/s mediante energía solar, contaba con distintos sensores para la captación de imágenes y podía hacer mediciones meteorológicas y analizar materiales de su entorno. El Sojourner estuvo operativo 83 días, bastantes más de los previstos, y llegó a recorrer unos cien metros, aportando gran cantidad de imágenes y datos de Marte y demostrando que los vehículos de dimensiones reducidas podían alcanzar una gran eficacia.

La robótica en la exploración espacial ha alcanzado también otros éxitos remarcables, como la misión Cassini-Huygens de la NASA, la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia Espacial Italiana. Esta misión tenía por objetivo estudiar los satélites de Saturno, mediante la sonda Cassini, y depositar sobre el planeta la cápsula Huygens, contenida en la sonda, con el fin de obtener información sobre las características de su superficie. El lanzamiento se produjo desde Cabo Cañaveral en octubre de 1997 y la sonda se situó en la órbita de Saturno en julio de 2004. La cápsula se separó del módulo cinco meses más tarde y se posó veinte días después sobre la superficie de este planeta. El final de esta misión está previsto para septiembre de 2017.

También cabe destacar la misión Rosetta de la ESA, que consistió en el lanzamiento en 2004 de una sonda que pudiera llegar a orbitar alrededor del cometa 67P/Churgumov-Guerasimenko entre los años 2014 y 2015, y enviar el módulo robótico de aterrizaje que transportaba, Philae, hasta la superficie del cometa en su paso por su perihelio (mínima distancia del Sol). El objetivo de la misión era obtener datos sobre la cola que forman los cometas en esta parte de su órbita.

La creciente implantación de la robótica

En los últimos lustros la robótica se ha expandido tanto en el sector industrial como en campos no industriales, como el mantenimiento, los servicios y las aplicaciones en el campo de la salud.

La implantación de robots ha avanzado impulsada por los progresos tecnológicos, especialmente por el continuo incremento en capacidad computacional. Este incremento se traduce en una mayor velocidad de operación, que a su vez aumenta la capacidad de ejecutar algoritmos más complejos, y en una mayor capacidad de adaptación a entornos más variados y cambiantes gracias a estrategias de control basadas en sensores, especialmente la visión. Se estima que actualmente operan en el mundo unos dos millones de robots, una cifra que puede considerarse elevada en términos absolutos pero que, respecto a la población mundial, representa solamente 2,4 robots por cada diez mil habitantes. Pero este indicador no tiene una especial relevancia considerándolo en función del número de habitantes, sino que suele utilizarse el cociente refiriéndolo al número de empleados en la industria manufacturera. Este es actualmente de 67 robots por cada diez mil empleados, aunque la distribución de robots en el mundo no es uniforme, como se aprecia en la figura 1. Hoy día el 57% de los robots operan en los países asiáticos (figura 2), una preponderancia respecto a Europa (23%) y a Estados Unidos (16%) que se prevé que aumente en el futuro.

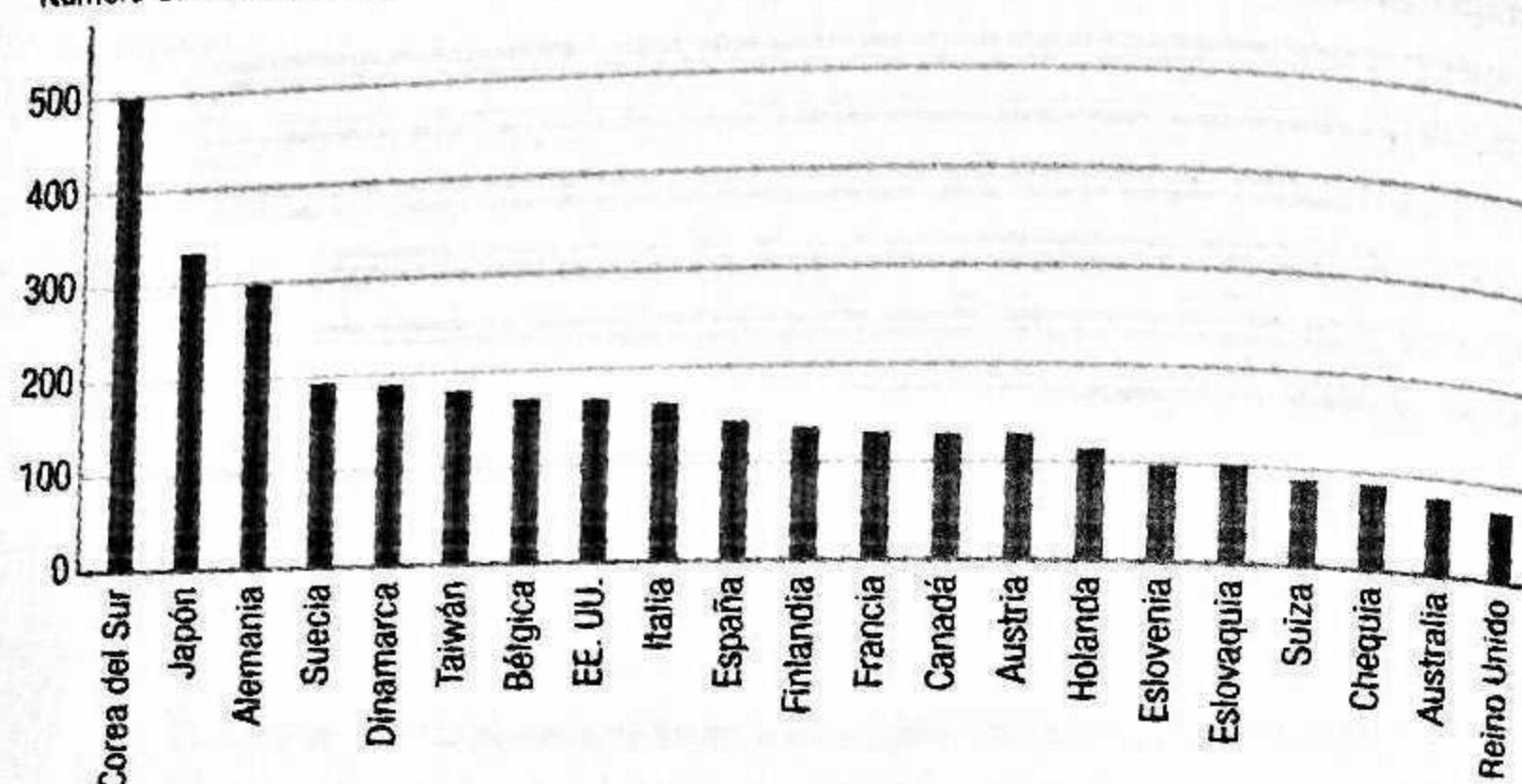
Actualmente, esta expansión se produce en una gran parte en el sector industrial, pero en los próximos años se producirá también en sectores no industriales, lo que previsiblemente producirá mayores tasas de crecimiento de la robotización.

APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA ROBÓTICA

Las principales aplicaciones de la robótica industrial se produjeron, en una primera fase, en la industria del automóvil, concretamente en las tareas en las que era suficiente con obtener precisiones milimétricas para conseguir la calidad deseada, y

FIG. 1

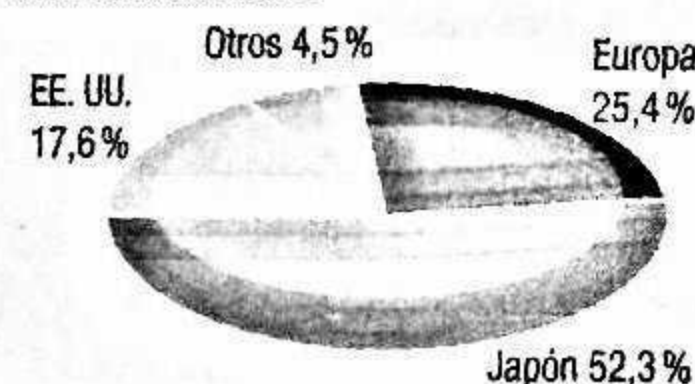
Número de robots por cada diez mil empleados



Densidad de robots en la industria manufacturera en 2016 en algunos países industrializados.

FIG. 2

1999: 700 000 robots



2011: 1 100 000 robots



2016: 1 800 000 robots



Evolución de la distribución mundial de robots entre 1999 y 2016. Aunque Europa y Estados Unidos han mantenido sus posiciones, hoy el mayor peso corresponde a los países asiáticos.

en las que la realización manual era más penosa para los operarios, como es el caso de la pintura y la soldadura.

En la aplicación de la robótica a las tareas de pintura, el elemento terminal es únicamente el pulverizador y los tubos acceso-

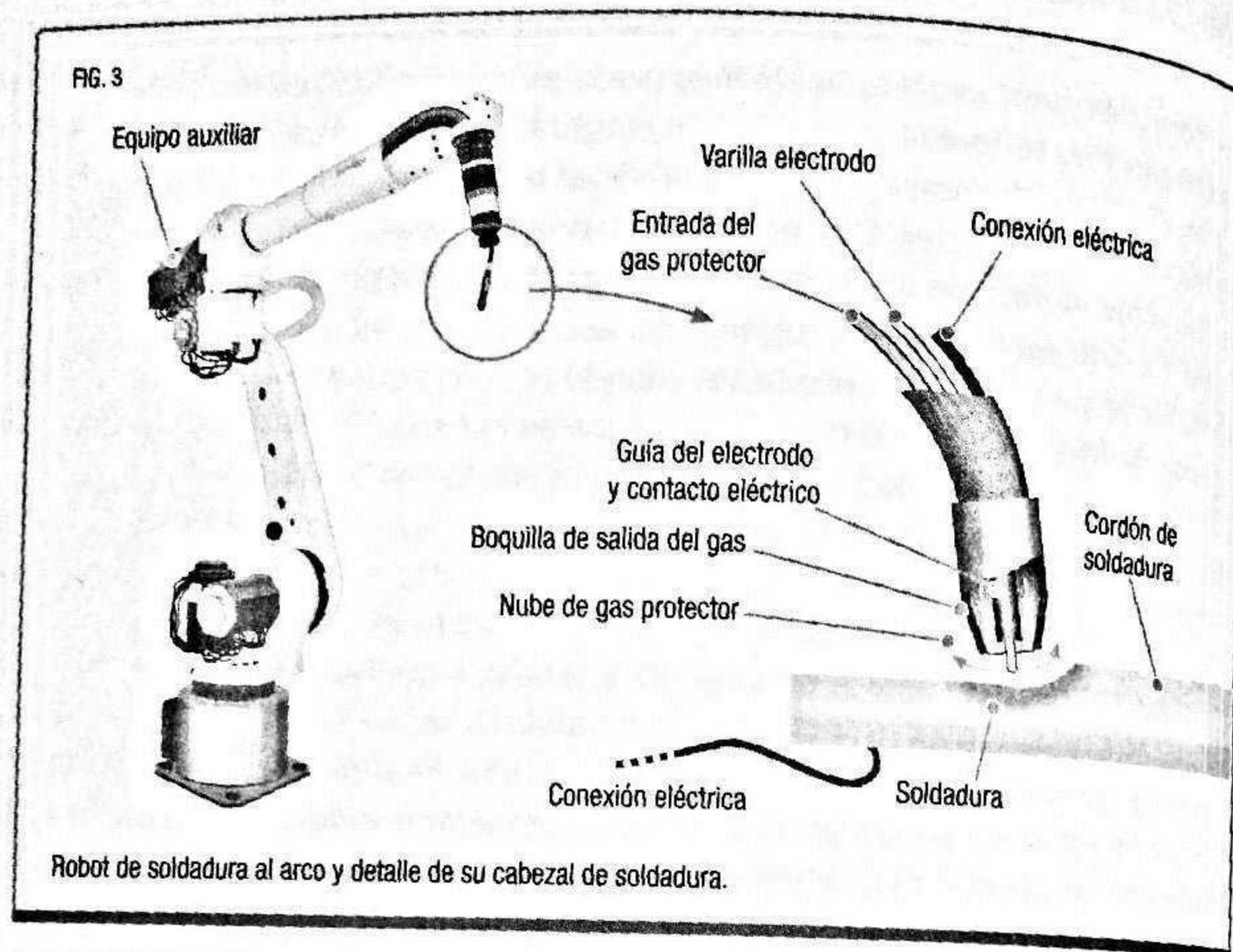
rios necesarios. Por este motivo, las características más relevantes del robot para estas aplicaciones serán su amplio volumen de trabajo y su reducida capacidad de carga. La robotización de la pintura permite garantizar la repetitividad en todas las piezas pintadas, lo que no es posible en tareas manuales. De esta forma se consigue el pintado uniforme y completo de toda la pieza, tal como ha sido previamente programado, así como minimizar las pérdidas de pintura que se producen cuando el pulverizado no se orienta de forma óptima o cuando se aplica en exceso.

Para optimizar el pintado se recurre a la electricidad estática, proporcionando al objeto una carga eléctrica positiva, opuesta a la del pulverizador. Así, las partículas de pintura a la salida del pulverizador son atraídas por la superficie del objeto, con lo que no solamente se consigue ahorrar pintura, sino que también facilitar su entrada en puntos inaccesibles frontalmente.

Aparte de conseguir una mejor calidad en los resultados, la robotización aplicada a este proceso permite prescindir de la presencia de operadores. Esto supone una ventaja considerable, pues debido a la pintura y también a los solventes utilizados, el proceso de pintado genera una atmósfera muy tóxica, de la que habrá que proteger al robot para garantizar su conservación.

Para aplicar la robótica en tareas de soldadura por puntos de resistencia es necesario manipular una carga relativamente voluminosa y pesada, de al menos 50 kg, ya que aparte de los electrodos y su refrigeración, el cabezal de soldadura debe albergar también el transformador, que es necesario para reducir la tensión a unos pocos voltios de trabajo y poder suministrar una corriente muy intensa, de varios cientos de amperios. Esta elevada corriente que se aplica en un área relativamente pequeña de las chapas que se quiere soldar, situada entre los electrodos, debe producir el calor suficiente para provocar la fusión que garantice la correcta soldadura. La robotización de esta pesada tarea, aparte de evitar tener que hacerla de forma manual, permite programar trayectorias muy optimizadas entre puntos de aplicación de los electrodos, cuyo acceso debe realizarse en espacios muy restringidos, y que exige maniobrar para conseguir este acceso sin colisiones.

FIG. 3



Robot de soldadura al arco y detalle de su cabezal de soldadura.

En la soldadura al arco (figura 3) se requiere efectuar trayectorias continuas a lo largo del cordón de soldadura, y la robotización hace posible alcanzar una mayor precisión y continuidad. En este caso el elemento terminal es más ligero que en la soldadura por puntos, dado que los elementos auxiliares necesarios —el alimentador motorizado del electrodo que se va consumiendo y el dispensador del gas protector para evitar la oxidación durante la soldadura— son equipos ligeros. Por otra parte, pueden ubicarse más cerca del eje del robot, ya que los cables y tubos necesarios son suficientemente ligeros y flexibles para poder alejarse del cabezal, por lo que el robot podrá ser más ligero que los robots utilizados para la soldadura por puntos.

Los mismos robots orientados a la soldadura por puntos también fueron utilizados para tareas de paletización, dado que para estas aplicaciones los requerimientos de carga transportada y volumen del espacio de trabajo son muy similares. La robotización de la paletización, además de evitar también el tener que

mover manualmente cargas pesadas, permite optimizar el apilamiento de objetos con la programación de las trayectorias capa a capa. De esta forma se consigue una compactación máxima, evitando los errores propios de la paletización manual, que producen riesgos de desplazamientos y caídas durante el transporte.

La robótica facilita la correcta paletización, tanto de objetos rígidos y paralelepípedicos como de cargas no rígidas, por ejemplo, algunos productos a granel envasados en sacos que, por su elevado peso, dificultan o impiden la paletización manual, como cementos, yeso u otros materiales de construcción, o de productos alimentarios tales como harinas y cereales.

El desarrollo de los minicomputadores en la década de 1970 facilitó la aparición de los centros de mecanizado por control numérico, que permitían efectuar los trabajos de torneado, taladrado o fresado de forma automática con precisiones muy elevadas. Sin embargo, existen muchas tareas en las que estas operaciones de mecanizado deben realizarse *in situ* y no es posible acceder a las máquinas de control numérico. En este caso la robótica permite efectuar estos trabajos como se harían manualmente, pero con la precisión y calidad propias del control numérico.

El problema que se presenta en estas aplicaciones es que para su ejecución es necesario dotar al robot de sensores de esfuerzos y elaborar una programación basada tanto en las coordenadas de operación como en los esfuerzos realizados. Así, por ejemplo, para ejecutar un perforado será necesario programar las trayectorias de aproximación y posicionado de precisión del útil sobre el centro del orificio, pero el avance no puede programarse con una velocidad constante, dado que esta dependerá de la dureza del material y del estado de desgaste de la herramienta. El avance del útil se realizará a fuerza constante, y finalizará al llegar a una cota predeterminada.

Actualmente la robótica es muy utilizada en la industria para los trabajos de mecanizado como el desbarbado, pulido, taladrado, fresado y sellado, así como para las tareas asociadas, como la manipulación o la verificación.

La manipulación es una operación relevante dentro de todo proceso industrial, y su robotización puede ser necesaria o

incluso imprescindible para evitar riesgos personales o para conseguir una mayor velocidad y fiabilidad de operación. La robotización en la manipulación se extendió primero en aplicaciones de carga y descarga de prensas, cizallas, estampadoras y, en general, en todo tipo de máquinas cuyo uso conlleva riesgos elevados. La manipulación robotizada también se extendió a la descarga de máquinas de inyección y a procesos de fundición, en los que la temperatura de los objetos o su peso constituyen un impedimento para la manipulación manual.

Las necesidades de manipulación en entornos industriales pueden requerir desplazamientos entre puntos relativamente lejanos, como en los almacenes robotizados; desplazamientos medios, como en las transferencias entre máquinas contiguas de una nave, o desplazamientos a distancias cortas, como es el caso de la carga y descarga de máquinas.

Cuando se necesita abarcar un espacio muy amplio, como sucede en los almacenes, la robótica se convierte en un elemento estructural de la instalación, ya que los desplazamientos largos requieren una estructura fija sobre la que los brazos robóticos puedan desplazarse a gran velocidad. La distribución en pasillos aconseja una arquitectura bidimensional, para efectuar desplazamientos a lo largo de una guía extendida de extremo a extremo del almacén, que arrastra a su vez una guía vertical para poder ascender y descender a lo largo de toda su altura (véase la fotografía superior izquierda de la página 101). Estos robots bidimensionales pueden situarse con precisión para acceder a los alojamientos situados a ambos lados del plano de operación, para depositar o recoger los objetos. Estos almacenes automatizados han adquirido una gran importancia para garantizar la logística interna y el control informatizado de *stocks*, y han potenciado la eficiencia de las empresas logísticas de transporte y distribución de mercancías.

La tecnología de los almacenes automatizados se ha extendido a todo tipo de mercancías y objetos, incluso para el almacenamiento de objetos de gran volumen. Por ejemplo, la necesidad de generar plazas de aparcamiento en zonas saturadas del casco urbano de las grandes ciudades, ha propiciado la adaptación de

esta tecnología para el almacenamiento automatizado de vehículos. De esta forma, se pueden construir en altura o en profundidad aparcamientos muy compactos, ya sea mediante estructuras robóticas cartesianas o de coordenadas cilíndricas, como la que se muestra en la fotografía superior derecha de la página 101, consiguiendo aparcamientos con una mayor densidad que aprovechan mejor el espacio urbano disponible.

Para distancias medias o cortas la manipulación de punto a punto, denominada habitualmente *pick and place*, es una tarea ampliamente robotizada en muchos procesos industriales, especialmente cuando el peso de los objetos no permite trasladarlos manualmente y cuando lo exige la precisión de la operación. Esta robotización permite también garantizar la trazabilidad de cada pieza.

Cuando la transferencia de piezas para la alimentación de una estación de trabajo se realiza con recipientes o soportes sin una ordenación determinada, por ejemplo utilizando cintas transportadoras convencionales, las piezas no están individualizadas y se utilizarán aleatoriamente. Pero si la transferencia de las piezas de la salida de una estación de trabajo a otra posterior se realiza mediante un brazo robótico y accesorios con alojamientos adecuados para albergar las piezas fabricadas, cada posición del soporte queda asociada implícitamente a los datos disponibles en una base de datos, que contendrá la información de cada pieza a medida que va siendo depositada, por ejemplo las cotas reales resultantes de su mecanizado. Si estos datos son accesibles para el robot de carga de la estación de trabajo posterior, el robot podrá elegir la pieza más favorable.

Por ejemplo, si se trata de realizar una inserción, podrá escoger entre las piezas disponibles una que consiga un mejor encaje. De esta forma, las tolerancias entre las piezas que deberán ser acopladas, o cualquier otra característica, serán más favorables que si esta elección se realizase de forma aleatoria. Esta optimización en la elección será tanto más eficiente cuanto mayor sea

Nuestra tecnología, nuestras máquinas, son parte de lo que nos hace humanos. Las creamos como extensiones de nosotros mismos [...].

RAY KURZWEIL

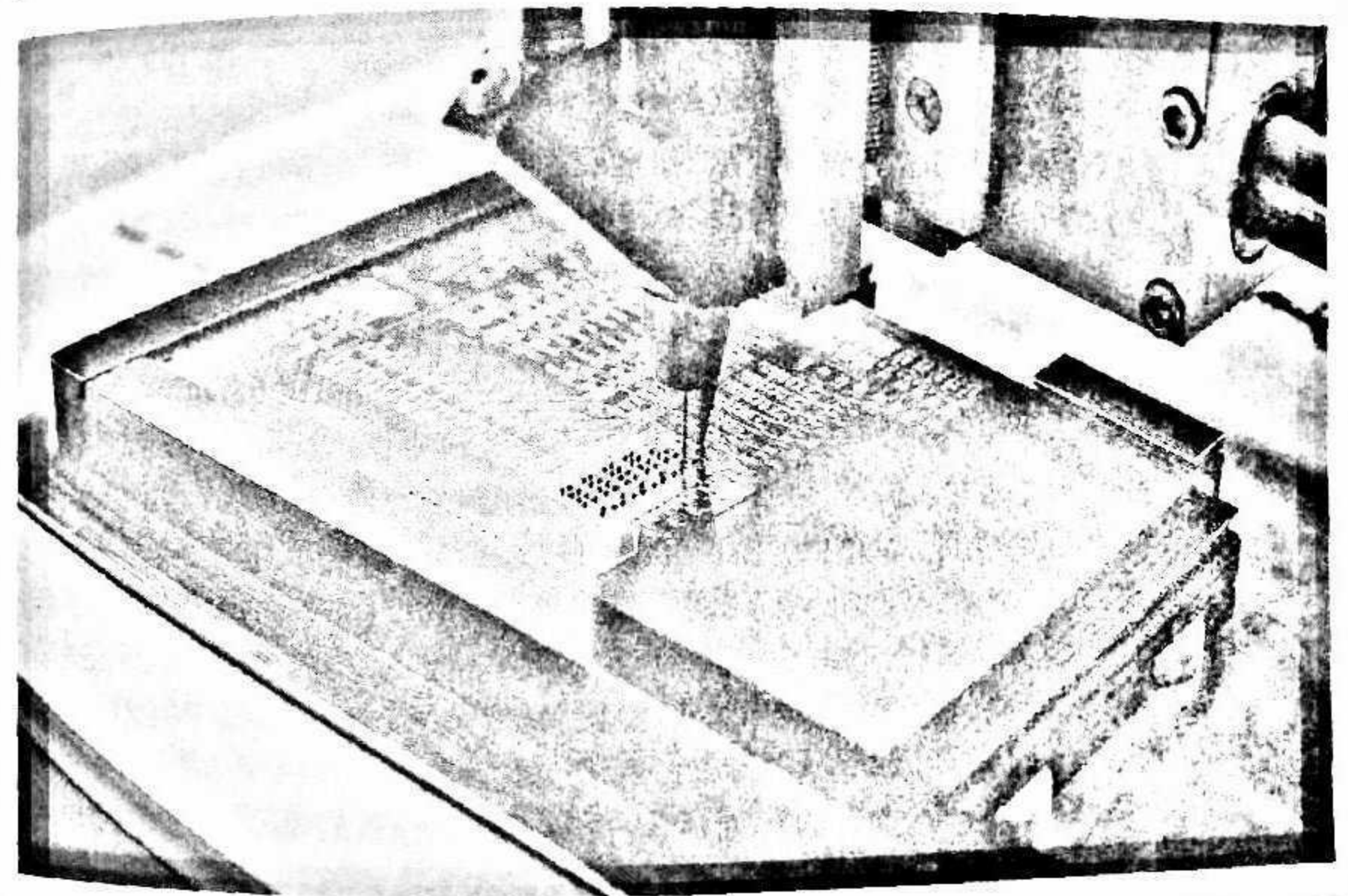
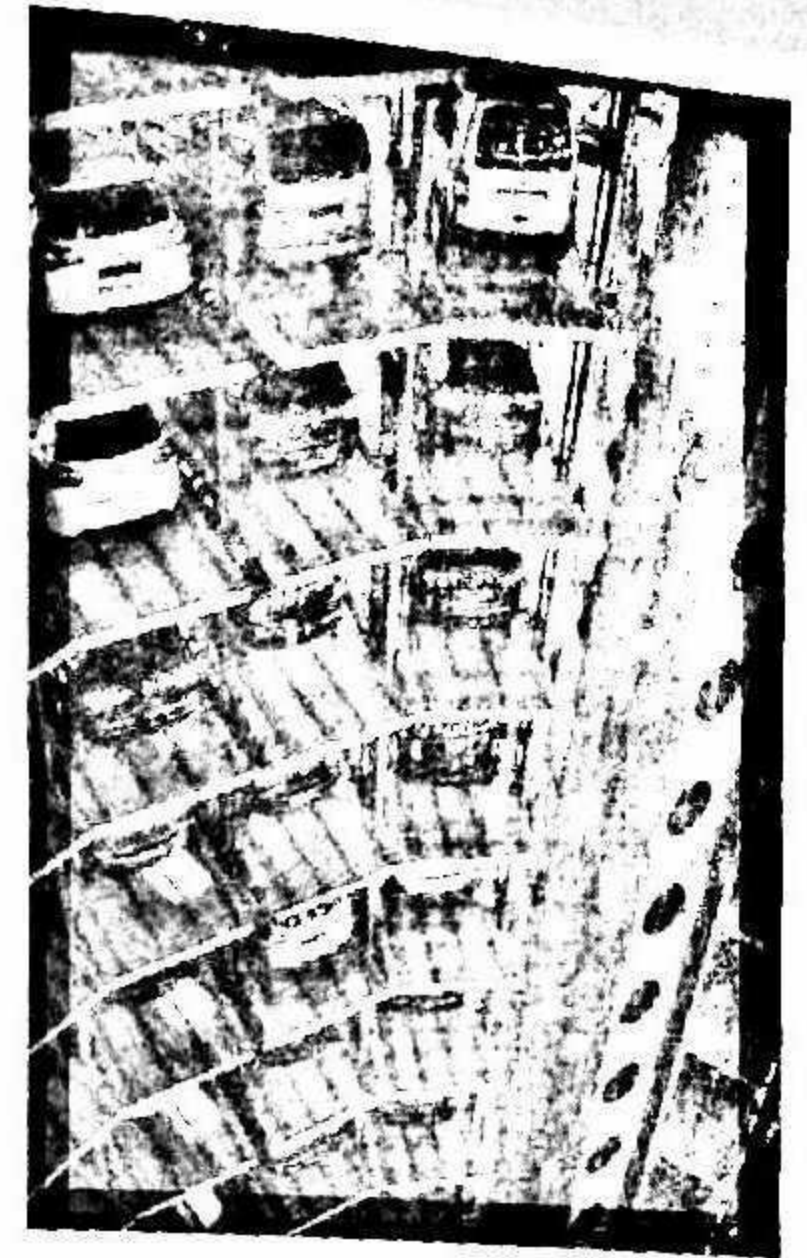
el número de piezas alojadas en cada contenedor. Con esta estrategia de elección del más favorable, la robotización implicará también una mejora en los niveles de calidad que pueden obtenerse contando con los mismos medios técnicos de producción.

Para piezas de mayor tamaño y valor o subconjuntos, estas estrategias de trazabilidad por localización ya no son necesarias, puesto que se justifica la utilización de identificadores de lectura/escritura remota por radiofrecuencia (RFI) individuales, aplicados a cada pieza.

La robotización se hace imprescindible en operaciones donde la precisión necesaria no se puede conseguir manualmente, como en operaciones de insertado de componentes electrónicos en una placa de circuito impreso (véase la imagen inferior de la página contigua). En este caso la robotización consigue el posicionado exacto de cada componente en su emplazamiento en el circuito impreso, con precisiones que pueden ser de 75 o 35 μm , con velocidades superiores a los diez componentes por segundo.

En los sistemas mecánicos las tolerancias normalmente son muy reducidas, del orden de las décimas o centésimas de milímetro. Un ensamblado con estas tolerancias, en principio, requeriría utilizar robots con una precisión superior a estas cifras, robots de muy altas precisiones y elevado coste. Es posible ejecutar tareas de montaje o ensamblado con robots de precisiones muy inferiores a las tolerancias mecanizadas llevando a cabo la tarea de inserción de forma similar a como se realizaría manualmente.

Es evidente que con nuestras manos no se pueden conseguir precisiones submilimétricas, ni siquiera milimétricas, pero es posible introducir de forma manual, por ejemplo, un eje en un cojinete, aunque las tolerancias de su mecanizado sean de unas centésimas. Para ello, la estrategia seguida por las manos de un operario experto es la de permitir una acomodación, es decir, que la posición del eje en el espacio no viene forzada por las manos del operario, sino que este se deja llevar en orientación y posición por las fuerzas que se producen durante la inserción, limitándose a efectuar una serie de esfuerzos en una u otra dirección hasta percibir el correcto avance. Para facilitar esta operación habrá sido necesari-



Arriba, robot vertical para almacenes automatizados (izquierda) y vista del interior de un aparcamiento con estructura de coordenadas cilíndricas (derecha). Debajo, cabezal empleado para la colocación de componentes electrónicos en la fabricación de placas de circuito impreso.

rio diseñar adecuadamente estas piezas, dotándolas de unos achaflanados que faciliten el inicio y guiado de la inserción.

En operaciones de montaje y ensamblado robotizado será, pues, necesario disponer de sensores de esfuerzos y programar la tarea con una estrategia más inteligente que la que requeriría un simple perforado realizado aplicando una fuerza constante. Esta estrategia se basará en programar una sucesión de esfuerzos en las direcciones en que se perciba un mayor avance con una menor fuerza, e incluso detectar los atascos que normalmente suelen producirse, procediendo en este caso a invertir los esfuerzos antes de reemprender la operación de ensamblado.

De la misma forma que para facilitar el inicio de la tarea es necesario diseñar adecuadamente las piezas que se van a ensamblar, previendo achaflanados y evitando aristas abruptas, también será necesario acondicionar el robot para realizar más fácilmente estas tareas de acomodación. Para ello se utilizan dos estrategias: la acomodación pasiva y la acomodación activa.

La acomodación pasiva consiste en introducir entre la muñeca del brazo del robot y el elemento terminal una elasticidad que permita al útil autoposicionarse de acuerdo con la evolución de la tarea, un posicionado que el robot no podría conseguir por su limitada precisión. En este caso la programación de la tarea es por coordenadas hasta alcanzar el punto teórico de inicio de la correcta inserción, y en la posición de este punto se inicia la estrategia de avance con esfuerzos lateralizados en una u otra dirección de forma preprogramada, tal como se realizaría manualmente. Las elasticidades introducidas permitirán que esta inserción se lleve a cabo aunque el posicionado del robot haya tenido un ligero error respecto a la posición realmente requerida. La cota de avance conseguida en cada momento es la información de que dispone la unidad de control del robot para verificar la correcta realización y finalización de la tarea.

La acomodación activa consiste en dotar al robot de sensores de seis grados de libertad para efectuar los movimientos y esfuerzos de ensamblado de forma no preprogramada, sino en función de los esfuerzos percibidos. Este dispositivo sensor de esfuerzos debe ser de seis grados de libertad, dado que el robot

es capaz de realizar una fuerza según las tres direcciones cartesianas respecto a la alineación del elemento terminal, pero también puede realizar un par de torsión en cada uno de estos tres ejes, por lo que es preciso percibir estos seis componentes.

Para garantizar la ejecución de tareas de ensamblado que conlleven cierta dificultad, frecuentemente se recurre a la acomodación activa pero introduciendo también las elasticidades que se necesitan en la acomodación pasiva.

Una gran cantidad de operaciones de montaje son muy difíciles de ejecutar de forma robotizada, dado que con una única mano se pierde mucha habilidad y que son escasos los montajes que pueden efectuarse con una sola mano. Para estos casos la industria se vale de elementos auxiliares, tanto para la fijación de la pieza como para introducir uno o más puntos de apoyo a fin de estabilizar o poder variar la posición de la pieza en determinadas fases del proceso. Estos elementos auxiliares pueden ser fijos o motorizados actuados por la unidad de control del robot. Estas salidas auxiliares pueden ser digitales (abrir/cerrar) o numéricas (posición, giro, fuerza...), y en este caso constituyen un grado de libertad adicional externo al robot.

Estos elementos auxiliares suelen resultar de gran eficacia y tienen costes muy reducidos, pero deben ser diseñados e implementados específicamente para cada aplicación. Una robotización más completa de estas tareas auxiliares presenta la ventaja de que se pueden adaptar por programa a tareas específicas e introducir fácilmente modificaciones y mejoras. Es por ello por lo que en los últimos años se ha comenzado a introducir robots bibrazo, especialmente orientados a la ejecución de tareas de montaje con los dos brazos, lo que permite operar de manera coordinada contando con un único equipo.

Estos robots pueden operar de forma preprogramada como dos robots convencionales o de forma teleoperada, y pueden llegar a realizar tareas con los dos brazos maniobrando coordinadamente y planificando la acción en tiempo real, distribuyendo dinámicamente el rol a cada mano de forma óptima para garantizar la fiabilidad de la operación. Para ello es necesario disponer de suficiente capacidad sensorial. Esta arquitectura

abre grandes posibilidades de aplicación de técnicas de inteligencia artificial para la realización de tareas complejas.

Un robot bíbrazo orientado a aplicaciones industriales es Motoman, desarrollado por Yaskawa Electric Corporation en 2004. Este robot está dotado de dos brazos de seis grados de libertad y un grado de libertad de giro del torso sobre su eje. Al estar diseñado para aplicaciones industriales, no requiere cabeza ni manos antropomórficas, sino que dispone de muñecas para acoplar los elementos terminales convencionales apropiados para cada aplicación.

Minería y obras públicas

La robótica, introducida inicialmente en la industria del automóvil, se fue extendiendo primero a la industria metalúrgica y electromecánica, y posteriormente en todos los sectores industriales, y también en la minería.

Los trabajos mineros, aparte del esfuerzo físico que exigen y de las duras condiciones de operación, se caracterizan por su peligrosidad, especialmente en la extracción de productos metálicos, que suele realizarse en galerías excavadas en profundidad. Este tipo de minería ha generado una robótica específica de grandes dimensiones, que consta de una plataforma móvil sobre la que se sustentan los útiles de trabajo, ya sea de extracción o de consolidación. La robotización de esta maquinaria conlleva que la plataforma pueda desplazarse de forma autónoma formando galerías previamente planificadas, disponiendo de sistemas de alineación mediante láser, y coordinando su avance con la tarea realizada por su cabezal.

Las perforadoras robotizadas permiten realizar la primera fase de la extracción de forma segura, manteniendo al personal alejado de la zona de más alto nivel de ruido. Después de la extracción es necesario llevar a cabo los subsiguientes trabajos de consolidación de la galería excavada, que deben realizarse en zonas consideradas como no seguras, por lo que también es necesario utilizar la robótica, tanto para el manejo, posicionado y fijación de las mallas como para el posterior proyectado del cemento.

ROBOTS ASTRONAUTAS

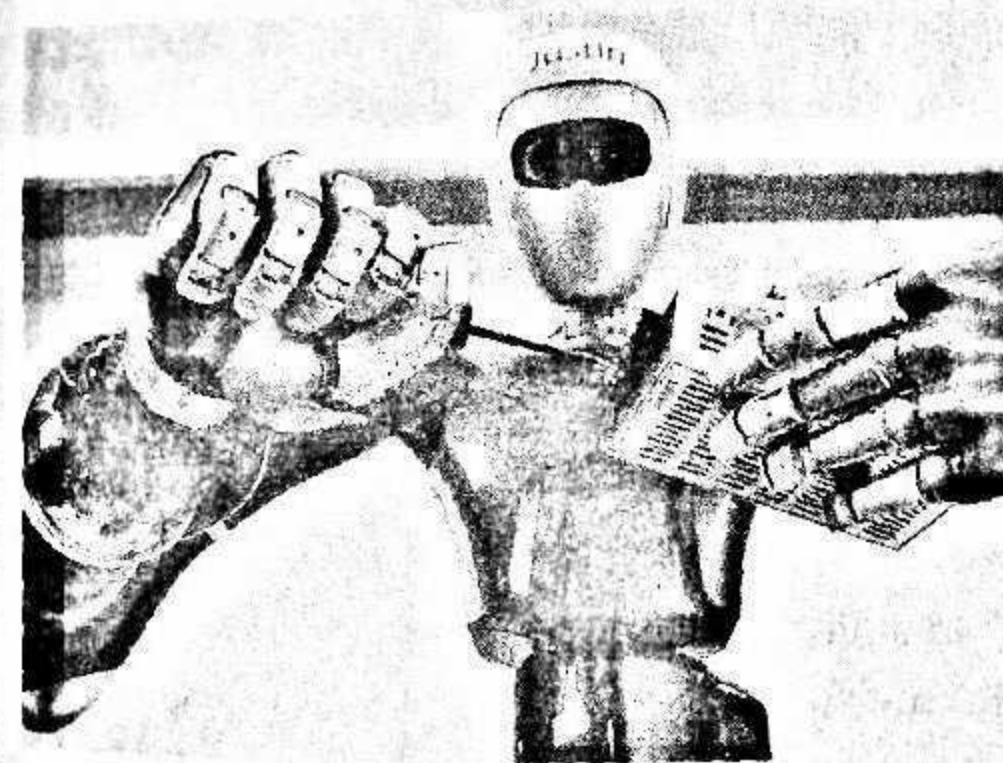
Además de las aplicaciones industriales, los robots bíbrazo resultan particularmente adecuados para realizar tareas en misiones espaciales.

Justin

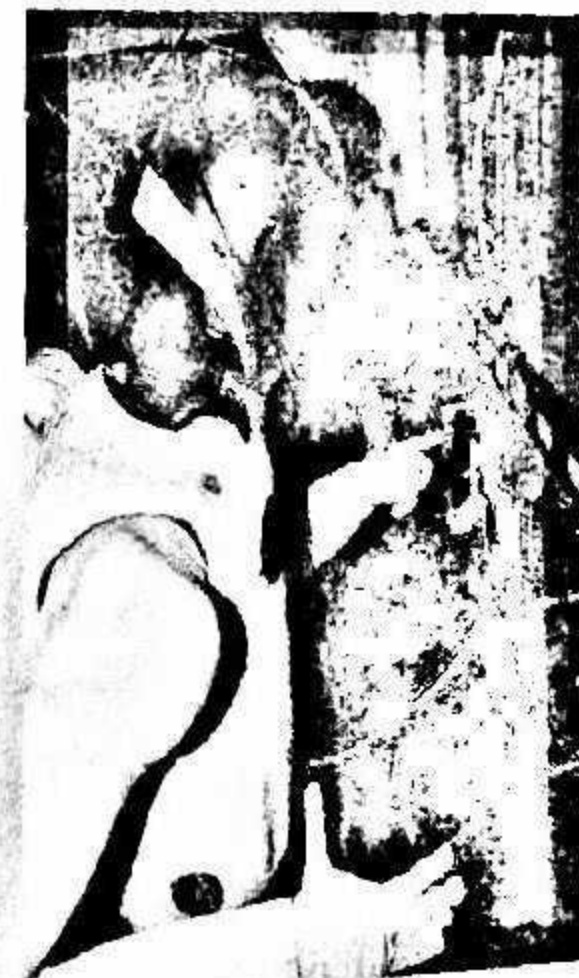
Uno de los primeros robots bíbrazo fue desarrollado por el *Institute of Robotics and Mechatronics*, del Centro Aeroespacial Alemán (DLR), e introducido en 2007. Este robot estaba dotado de dos brazos de siete grados de libertad y un torso común con cinco grados de libertad —en total diecinueve grados de libertad— y de manos antropomórficas, cada una con cinco dedos, con un total de doce grados de libertad en cada mano, ya que fue concebido inicialmente para sustituir a los astronautas en las estaciones espaciales, para maniobrar y reparar satélites en órbita. Para lograr unos resultados óptimos en la ejecución de las tareas, Justin está dotado, además, de 41 sensores de esfuerzos distribuidos en sus elementos articulados, y permite estimar el par desarrollado por sus 43 actuadores. También dispone de visión estereoscópica para visualizar la escena de trabajo, de un sensor láser para realizar mediciones precisas tridimensionalmente, y de un sensor inercial en la estructura troncal para asegurar su estabilidad.

Robonaut

Otro robot bíbrazo que ha alcanzado gran notoriedad es Robonaut, un robot diseñado por el *Dexterous Robotics Laboratory* de la NASA, en el Centro Espacial Lyndon B. Johnson, en Houston, Texas. Este robot comenzó a desarrollarse en 1997 y en 2011 se probó en el espacio a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS, por sus siglas en inglés). Igual que Justin, el robot del DLR, está dotado de dos brazos con siete grados de libertad y con manos de cinco dedos con un total de doce grados de libertad en cada mano.



A la izquierda, Justin muestra su capacidad de manipular objetos. A la derecha, Robonaut trabajando en el laboratorio Destiny de la Estación Espacial Internacional durante una expedición en 2012.



La minería no metálica normalmente se lleva a cabo en canteras a cielo abierto y también requiere maquinaria robotizada, pero de unas dimensiones muy superiores. Estas excavaciones pueden alcanzar extensiones y profundidades enormes. La mayor excavación a cielo abierto del mundo es la mina del cañón de Bingham, en Utah, Estados Unidos, una mina de cobre con una excavación de más de 1,2 km de profundidad y 4 km de diámetro.

Este tipo de minería requiere equipos de enormes dimensiones, lo que obliga a su robotización dadas las dificultades para lograr un control manual convencional sobre la propia máquina, por falta de visibilidad debido a la nube de polvo que suele provocar, o por la imposibilidad de visualizar el espacio de trabajo y maniobrabilidad de la plataforma. Por eso, este tipo de máquinas se controlan desde una estación de seguimiento remota, complementando las imágenes directas con modelos físicos del entorno.

En ambos tipos de minería, subterránea y a cielo abierto, la robotización abarca desde el equipo extractor hasta el equipo necesario para la evacuación de los materiales extraídos, generalmente mediante cintas transportadoras, también robotizadas para adaptarse y complementar el trabajo del propio cabezal extractor.

En cuanto a las grandes obras públicas, la robótica comenzó a aplicarse en la década de 1980, en tareas como la perforación para cimentaciones, la nivelación de terrenos, la construcción de muros de contención con prefabricados o el bombeo y aplicación de cemento. Ello fue posible gracias a que ya se disponía de sistemas de posicionamiento global (GPS) y técnicas láser para conseguir un posicionamiento preciso, el requisito necesario para poder ejecutar de forma automática estas tareas. Su robotización ha permitido conseguir una mayor capacidad de control y precisión.

Actualmente existe una amplia gama de equipos robotizados orientados a la realización de obras públicas. Estos equipos son muy específicos para cada tipo de tarea, ya sea la explanación de terrenos o el nivelado del hormigonado de grandes superficies.

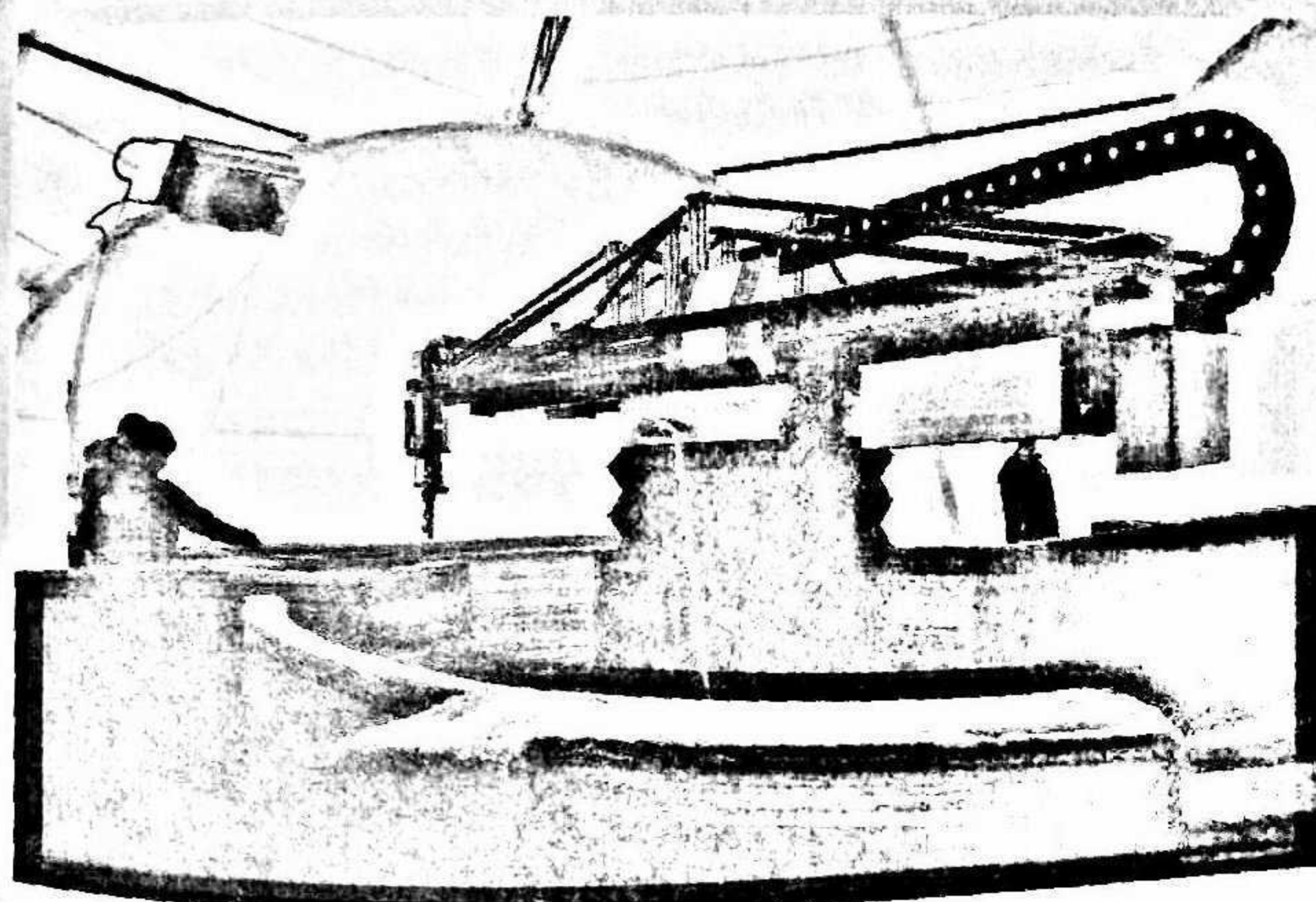
Para la construcción de grandes infraestructuras, como puentes y acueductos, se han desarrollado robots de muy grandes dimensiones, capaces de montar tramos de plataformas

LA ROBOTIZACIÓN LLEGA A LA CONSTRUCCIÓN

Durante muchos años la industria de la construcción ha permanecido reacia a la adopción de la robótica, dadas las dificultades de operación a pie de obra. En cambio, el uso de robots a pie de obra resulta muy favorable para realizar tareas de demolición, ya que no se requiere mucha precisión y, además, al ser robots teleoperados, evitan la exposición de los operarios al polvo y a los riesgos que suponen los desprendimientos inesperados, las caídas de materiales o el contacto con productos contaminantes, como el amianto.

La construcción modular

Las técnicas de fabricación automática en la construcción pueden introducirse más fácilmente en naves adaptadas para esta actividad, utilizando las técnicas de fabricación modular y de construcción de edificios por ensamblado de módulos que se erigen de forma robotizada a cierta distancia de la obra. Las técnicas más utilizadas para la fabricación robotizada de módulos para la construcción de edificios son la del llenado de moldes de tramos de pared con cemento, en los que previamente se han depositado las mallas estructurales y elementos que quedarán insertados en las paredes robotizadamente; la de colocación robotizada y cementado de ladrillos conformando tramos de pared, o mediante la construcción de módulos con cemento por técnicas aditivas (impresoras 3D de cemento). Estas técnicas se han introducido especialmente en China, donde es frecuente la edificación de hoteles o de bloques de edificios en tiempos récord de unos pocos días.



Las impresoras 3D de cemento permiten construir estructuras y edificios enteros rápidamente. La de la imagen pertenece a una compañía rusa.

prefabricadas entre pilares en la construcción de autopistas o ferrocarriles. Este tipo de equipos robotizados ha facilitado la construcción de grandes infraestructuras y ha disminuido los riesgos y la siniestralidad de estos tipos de trabajos en altura.

La construcción de vías de tren de alta velocidad requiere elevadas precisiones, tanto para el extendido, perfilado y estabilización de la capa de basalto como para la colocación y el nivelado de las traviesas, y la fijación de las vías ferroviarias sobre las traviesas en los trazados. La robotización permite dar respuesta a esta necesidad de mayores precisiones.

Las tuneladoras son verdaderos robots oruga gigantes diseñados para avanzar y poder controlar tanto la orientación como la profundidad de avance. Su objetivo es abrir túneles de sección circular, que pueden alcanzar diámetros de hasta veinte metros, avanzando en subsuelos blandos o rocosos con velocidades que oscilan entre los diez y los treinta metros por día. El avance de las tuneladoras es de tipo peristáltico (como el de las lombrices). Además de excavar, la tuneladora realiza también las tareas de consolidación del túnel. Para ello está dotada de una zona de almacenamiento de dovelas (unos prefabricados curvados para encajar en la sección excavada) y de una sección de insertado de estas piezas, de modo que se va formando un forro cilíndrico, que es consolidado mediante la inyección de cemento.

Las tuneladoras excavan túneles en profundidad en entornos urbanos sin afectar a la actividad en superficie, lo que ha hecho posible acometer retos como la construcción del Eurotúnel —la conexión por ferrocarril desde Francia al Reino Unido por el canal de la Mancha—, cuya perforación se realizó a razón de unos veinte metros por día, entre 1988 y 1994.

Industrialización y robotización en otros sectores

Una de las causas del crecimiento demográfico acaecido en el siglo XIX fue la introducción de la tecnología y la industrialización en la agricultura, que permitió dar respuesta al aumento de la demanda de los productos agrícolas.

La evolución tecnológica llegó a la agricultura primero con la sustitución del arado de madera tirado por caballos o bueyes —una técnica que se mantenía desde antes de la época romana— por el arado con puntas metálicas, a principios del siglo XIX, consiguiendo mucha mayor eficiencia. Pero la Revolución Industrial no llegó a la agricultura hasta el siglo XX, con la sustitución de la tracción animal por el tractor. A este avance le siguió el desarrollo del resto de equipos necesarios para completar el ciclo productivo agrícola (siega, recolección y trillado del grano) mediante cosechadoras. Esta primera generación de maquinaria agrícola comenzó a ser sustituida por una segunda generación más automatizada, gracias a la aplicación del GPS a finales del siglo XX, para el posicionado y guiado en campo abierto.

Actualmente, la maquinaria de tercera generación tiene por objetivo una automatización que se extiende a todo el proceso de una explotación agrícola, y no solo de las máquinas individuales. Una automatización que alcanza también la optimización de los recursos empleados durante todo el ciclo, como el riego y el uso de abonos y pesticidas, con criterios de sostenibilidad y respeto al medioambiente. Este objetivo exige disponer de robots totalmente autónomos que puedan desplazarse por espacios abiertos y suelos no uniformes, y poder ejecutar las tareas asignadas de forma aislada o en grupo. Para ello ha sido necesario desarrollar robots más robustos frente a las irregularidades del terreno y las peculiaridades propias de los entornos agrícolas.

Para llevar a cabo las tareas de sembrado o recolección de cereales, leguminosas y productos hortofrutícolas en campo abierto, existe ya una amplia gama de robots autónomos operativos en entornos extensos y libres de obstáculos. Para la recolección de frutas —tarea que sigue siendo un reto de la robótica en la agricultura— se requieren sistemas de visión tridimensional capaces de reconocer y localizar la fruta en un entorno muy complejo, entre las hojas del árbol, y disponer de robots de relativamente gran alcance, dadas las dimensiones de la mayor parte de los árboles frutales. Para la robotización de los trabajos agrícolas en los viñedos no se presentan los problemas derivados de las dimensiones de los

árboles frutales, pero las limitaciones en precisión y en fiabilidad de detección que presentan los sistemas de visión tridimensionales aún suponen un obstáculo para la robotización de los trabajos de recolección. Por otra parte, a pesar de los avances en el desarrollo de la inteligencia artificial, la robotización de las tareas de poda de los viñedos no iguala la efectividad conseguida por unas manos expertas. Es por ello por lo que todavía no se ha alcanzado un nivel de eficiencia suficiente en la robotización de la explotación de los viñedos.

Los drones vigilan las enfermedades y recogen datos en tiempo real sobre la salud y los rendimientos de los cultivos.

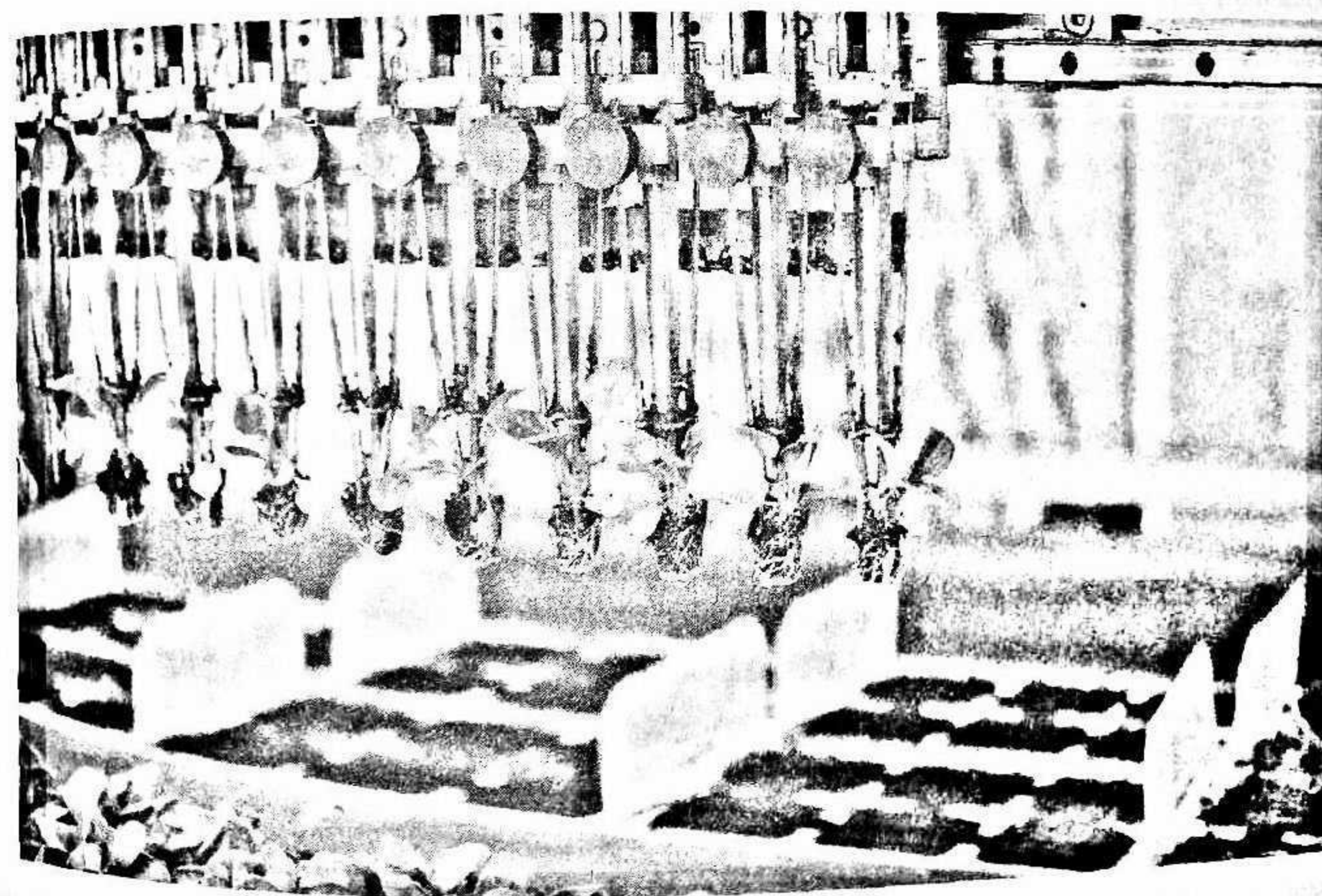
PETER DIAMANDIS

El uso de drones en cultivos en campo abierto constituye un elemento importante de apoyo a la optimización de recursos en explotaciones agrícolas. Las funciones de los drones en este entorno son principalmente dos. Por una parte, la toma de imágenes que permiten apreciar el grado de desarrollo o de afectaciones por parásitos en cada punto de la explotación, y adecuar tanto el riego como la aplicación de fertilizantes o de productos fitosanitarios. Por otra parte, los drones también se utilizan para efectuar pulverizaciones a mucha menor distancia de la que pueden hacerlo otros medios aéreos, lo que minimiza las pérdidas y permite una aplicación más selectiva, reduciendo el impacto sobre el medio.

La robotización en las explotaciones en invernaderos, a diferencia de la agricultura en campo abierto, presenta las ventajas de poder navegar por suelos más uniformes; introducir elementos auxiliares de ayuda para la navegación de los robots en los espacios asignados; estructurar el entorno con mayor rigidez, al poder disponer, por ejemplo, de elementos de soporte dispuestos geométricamente y de forma adecuada para facilitar un acceso más libre de obstáculos, o poder situar cámaras fijas para obtener imágenes.

El trabajo en los invernaderos requiere disponer generalmente de robots con brazos para la manipulación y para efectuar las operaciones que requiere la realización de trabajos como la poda o la recolección de frutas o flores.

En los entornos forestales, la robótica persigue el objetivo de superar las dificultades de acceso y las duras condiciones de tra-



Arriba, la tuneladora usada en la construcción del Eurotúnel expuesta en Coquelles, Francia, uno de sus extremos. Debajo, trasplante automatizado de brotes en un invernadero robotizado.

bajo manual que representan tareas como la tala y el descortezado para la producción de madera. La complejidad asociada a estos entornos ha obligado a desarrollar robots tripulados que, gobernados manualmente, puedan realizar el trabajo de forma mecánica, evitando tanto la fatiga física como los riesgos para las personas involucradas en estas tareas.

Para ello se han desarrollado cabezales para brazos robóticos montados sobre plataformas móviles, capaces de efectuar la tala y el descortezado en muy pocos segundos. Estos cabezales están dotados de unas grandes tenazas, para abarcar el diámetro del tronco, que puede ser de grandes dimensiones; una hoja motosierra para efectuar el corte, y un sistema de arrastre del tronco sobre las garras, que, al estar dotadas de unas cuchillas, permiten efectuar el descortezado, pelado y corte de las ramas laterales. Estos brazos robóticos están diseñados para soportar todo el peso del árbol, pero no el par de fuerzas que se produce durante su caída, por lo que el brazo acompaña al tronco mientras cae, dirigiéndolo hacia la zona de apilamiento de los cortes del tronco ya descortezado y pelado para su transporte.

La utilización de la robótica para el talado, pelado y troceado de árboles es de tal eficacia que permite una explotación forestal muy eficiente y rentable incluso en entornos abruptos, pero también representa una amenaza por un uso abusivo en operaciones de deforestación masiva, como está sucediendo en determinadas zonas de la Amazonia.

Por otra parte, el hecho de disponer de imágenes obtenidas desde torres de vigilancia permite, mediante un tratamiento digital adecuado, efectuar la detección automática de incendios. La aplicación de los drones resulta un complemento muy eficaz dentro del conjunto de la optimización de recursos en la explotación forestal, al poder obtener imágenes más precisas y cercanas, tanto para la detección visual de afectaciones o brotes de plagas como para poder evaluar el desarrollo forestal y una planificación de tareas.

En cuanto a la industria ganadera, asumió el uso de la robótica muchos años antes que la agricultura, dado que la robotización en el interior de una granja no debe afrontar los problemas

que presenta la navegación en espacios abiertos con suelos no uniformes. Así, se han ido desarrollando diversos sistemas robóticos específicos para distintas necesidades de este sector.

Las primeras aplicaciones de la robotización en la ganadería se produjeron en granjas de producción de leche en Suiza a principios de la década de 1990. Estas instalaciones se han ido perfeccionando, y hoy son capaces de identificar a la vaca que entra en la estación de ordeño, sujetarla, inspeccionar la ubre para adecuar la disposición de las copas de ordeño, efectuar el ensamblado de las copas en las correspondientes tetillas, y succionarlas tomando al mismo tiempo las medidas del caudal y el control de calidad. Una vez finalizada la operación, el robot retira las copas y, finalmente, trata la ubre con antibióticos.

También en la década de los noventa comenzaron a desarrollarse en Australia —donde la industria de explotación lanera de las ovejas de raza merina es muy relevante— sistemas robotizados de esquileo de ovejas. Los brazos robóticos destinados a este fin emulan las trayectorias propias de un buen esquileador, manteniendo las cuchillas en paralelo a la piel del animal mediante sensores, para evitar los cortes.

Los mataderos también han introducido la robótica en todas las fases del proceso de obtención de la carne. En primer lugar, los sistemas robotizados efectúan la inmovilización del animal; el aturdimiento por pistola de perno, eléctricamente o por gas, y el sacrificio y desangrado, de manera que el proceso evite causar lesiones y estrés al animal y garantice el sacrificio sin dolor. También se han desarrollado estaciones robotizadas para el desuello y corte de la cabeza y las patas; desuello de los costados; extirpación de las tripas y los intestinos; extirpación de los órganos, y desuello y descuartización de la pieza, una robotización muy específica, que mejora tanto la calidad como la higiene de los trabajos de producción cárnica en los mataderos.

En el caso de la automatización de la producción en la industria avícola, la tecnología utilizada es la propia de la producción automatizada de grandes series, que permiten la obtención de muchos miles de unidades diarias en óptimas condiciones higiénicas. En estas instalaciones se combina el uso de la robótica

convencional y las máquinas específicas, según las características de la tarea y las dimensiones y peso de las piezas. También se introducen sistemas de inspección automáticos, especialmente la visión por computador, para garantizar la calidad de las tareas en cada fase y facilitar la selección y el envasado de los productos antes de su comercialización.

La industria alimentaria ha alcanzado un alto grado de robotización, tanto por la tipología de los trabajos como por los niveles de higiene que se requieren. La robotización en este sector comprende las tareas de producción, la manipulación, la selección y el control de calidad y, por último, el empaquetado y embotellado.

Una de las primeras tareas de producción robotizadas fue la dosificación de la pasta para la confección de productos de pastelería en la entrada del horno, así como su posterior selección y envasado. Estas aplicaciones tuvieron especial éxito en Japón, donde se instalan en el propio escaparate a fin de mostrar que el proceso de producción se lleva a cabo de forma higiénica, un aspecto muy relevante en la cultura japonesa. La robótica también se utiliza en la pastelería para la decoración de bombones o tartas con chocolate, mantequillas o azúcar caramelizado, y permite elaborar dibujos muy variados y personalizados, compatibilizando la complejidad del diseño con la simplicidad de ejecución y programación.

Una tarea muy significativa en el proceso de producción es el corte, tanto de carnes, pescados y verduras como de pasteles y otros productos cocinados. Existen diferentes técnicas según el producto para conseguir un corte limpio, sin roturas ni resquebrajamientos. Las más empleadas son el corte mecánico, por ultrasonidos e incluso por chorro de agua.

El corte mecánico, con cuchillas convencionales, requiere un brazo para realizar el corte y elementos de sujeción para mantener fijo el elemento cortado. Debido a la variabilidad de formas y dimensiones del producto y a la posibilidad de que se deforme, para guiar el corte puede recurrirse a un escaneo previo de la pieza, para generar un modelo de su forma que permita determinar en cada caso la trayectoria del elemento terminal de corte.

Una variante del corte con cuchillas es el corte mediante ultrasonidos, un método muy apropiado para productos delicados de poca consistencia, como suflés, pasteles o piezas de chocolate. Este corte se realiza con un cuchillo vibrador que funciona prácticamente sin fricción, de manera que al no clavarse físicamente la cuchilla sobre el producto no lo deforma.

Para el corte de verduras, hortalizas, pescados y pasteles u otros cocinados, puede recurrirse al corte por chorro de agua, un corte más nítido producido por un fino chorro de agua a presión (2 000-4 000 bar) que, aplicado sobre el producto, efectúa el corte programado de forma más limpia, sin producir migajas, residuos o deformaciones de la superficie cortada.

La manipulación es otra tarea de la industria alimentaria que conviene robotizar, tanto para asegurar las condiciones de higiene necesarias como para conseguir una manipulación segura que mantenga la integridad del producto en sus desplazamientos y acciones de agarre y posicionado. Para ello, el robot deberá estar dotado de un elemento terminal adecuado, que, por la gran diversidad de tareas y productos, puede ser de muchos tipos: vacío, pinzas, palas... Para conseguir una mayor eficacia, en la manipulación de algunos productos se usan elementos terminales múltiples, que permiten la manipulación simultánea de varias piezas.

La manipulación es particularmente relevante para la entrada y salida de productos del horno, formando parte del sistema de transporte de productos en la cadena de producción, y se hace especialmente necesaria en el almacenamiento en congeladores, por los riesgos que puede suponer para una persona soportar bajas temperaturas durante largos periodos de tiempo en su jornada laboral.

Una parte esencial del proceso productivo en el sector alimentario es la de selección y el control de calidad. La selección por tipos de productos o la clasificación por medida o por calidad separa los productos en la cadena de producción para que sigan diferentes itinerarios o lleguen a sus correspondientes destinos. La casuística y diversidad de necesidades es muy extensa, pero un problema común en las estaciones de selección y control de calidad es el de posicionar la pieza adecuadamente

dentro del campo de visión o del rango de operación del sensor correspondiente, para cuantificar uno o más parámetros de interés. Las aplicaciones pueden ser: la clasificación de fruta por el grado de maduración, mediante análisis del color, textura superficial o medida de sus dimensiones; la clasificación de carnes según el contenido en grasas mediante sistemas de visión por computador, y la verificación y control del grado de tostado en pastelería, o el sexado de pescado —puesto que las huevas de ciertas especies tienen un valor muy superior a la carne del pescado en sí—, un aspecto importante en el sector conservero.

Una gran parte de los procesos de selección y control de calidad se realizan visualmente, mediante sistemas de visión por computador, que son programados en cada caso para analizar los distintos parámetros que caracterizan los factores de calidad del producto, como las proporciones de diferentes niveles de intensidad o la presencia de determinados colores, o mediante el análisis de las tipologías identificables correspondientes a manchas o a desperfectos. El empaquetado en la industria alimentaria también se lleva a cabo mediante robots, lo que garantiza las necesarias condiciones higiénicas de esta operación y de toda la cadena productiva.

Esta progresiva introducción de la robótica en un espectro tan amplio de aplicaciones ha sido posible gracias al continuo progreso experimentado por la microelectrónica y la informática, lo que ha permitido disponer de unidades de control de mayor capacidad y menor coste. Gracias a estos avances, se han desarrollado nuevas generaciones de robots con mayor velocidad de operación y más capacidad de control basado en sensores del entorno y, por tanto, con mayor posibilidad de afrontar los problemas propios de los sectores productivos no industriales.

Presente y futuro de la robótica

En el siglo xx el éxito de la robótica se basó en realizar tareas con velocidad, precisión y fiabilidad crecientes. Hoy día la robótica se abre a un amplio campo de aplicaciones, y su impacto social irá en aumento. Además de su influencia en el mercado laboral, su presencia en el ámbito doméstico será cada vez mayor y comportará cambios de hábitos y relaciones sociales.

La robótica industrial ha ido extendiéndose paulatinamente, aumentando sus prestaciones a medida que las mejoras tecnológicas lo han ido haciendo posible. Una de las principales innovaciones ha sido la introducción de las plataformas móviles, ya sea dotadas de capacidad de navegación autónoma o de capacidad de teleoperación. Mientras que los robots manipuladores están concebidos para operar en una estación de trabajo fija, el reto de los robots móviles es el de navegar hasta la posición objetivo y, en el punto de operación, controlar la actuación, que deberá estar coordinada en cada momento con la posición del propio robot.

Sin embargo, los mayores avances se han producido principalmente por el aumento de capacidad de los robots para tomar decisiones y adaptarse a condiciones cambiantes o inciertas del entorno, es decir, por los pasos dados hacia una robótica más inteligente. En el sector de los servicios, a diferencia de lo que ocurre en la industria, no es posible adaptar el entorno para sistematizar la tarea de los robots, y estos han tenido que dotarse de capacidad de percepción y de interpretación para poder actuar de forma autónoma, con mayor o menor grado de inteligencia según la aplicación.

LOS ROBOTS MÓVILES

El robot, como brazo ejecutor de una estrategia de actuación controlada por computador, no siempre puede realizar las tareas propuestas desde una posición estática determinada. En muchas aplicaciones, el robot debe estar dotado de la movilidad necesaria para poder desplazarse y acceder a la zona de trabajo.

Para conseguir esa movilidad es necesario disponer tanto de los medios físicos de locomoción como de los sistemas de percepción precisos para poder realizar la ruta de navegación y acceso al lugar previsto y el posicionamiento frente a la zona de operación, evitando los obstáculos que puedan surgir. La robótica ha conseguido ya superar estos retos para muchas aplicaciones, tanto sobre superficies terrestres como en los fondos marinos o incluso en vuelo.

Robots terrestres

Una primera familia de robots móviles son los robots terrestres, que se desplazan sobre un espacio bidimensional, ya sea sobre superficies planas —como los robots de interior, que navegan sobre el suelo de una planta industrial o un edificio— o sobre superficies rugosas o muy irregulares —como los robots de exterior—. Una variante de los robots terrestres son los robots trepadores, cuya misión es desplazarse sobre superficies verticales o inclinadas, que también pueden ser lisas, como la fachada de un edificio, o más agrestes, como entornos que van desde la bodega o el casco de un buque hasta una montaña.

La rueda es el elemento que permite una mayor eficiencia energética para efectuar un desplazamiento sobre una superficie cuando esta es lo suficientemente uniforme. El desplazamiento con ruedas sobre una superficie horizontal en teoría no supone realizar trabajo alguno si se mantiene una velocidad uniforme. En realidad, la energía necesaria en este caso no será nula, sino que será la que se requiera para vencer los rozamientos de los elementos mecánicos en movimiento, la resistencia ejercida por la deformación de las ruedas en su avance y la resistencia del

aire. El conjunto de estas fuerzas resistentes puede ser muy reducido, consiguiéndose una eficiencia muy alta. Es por ello por lo que, por ejemplo, con un mismo esfuerzo físico, un ciclista será capaz de efectuar un desplazamiento que puede ser de hasta diez veces mayor que caminando.

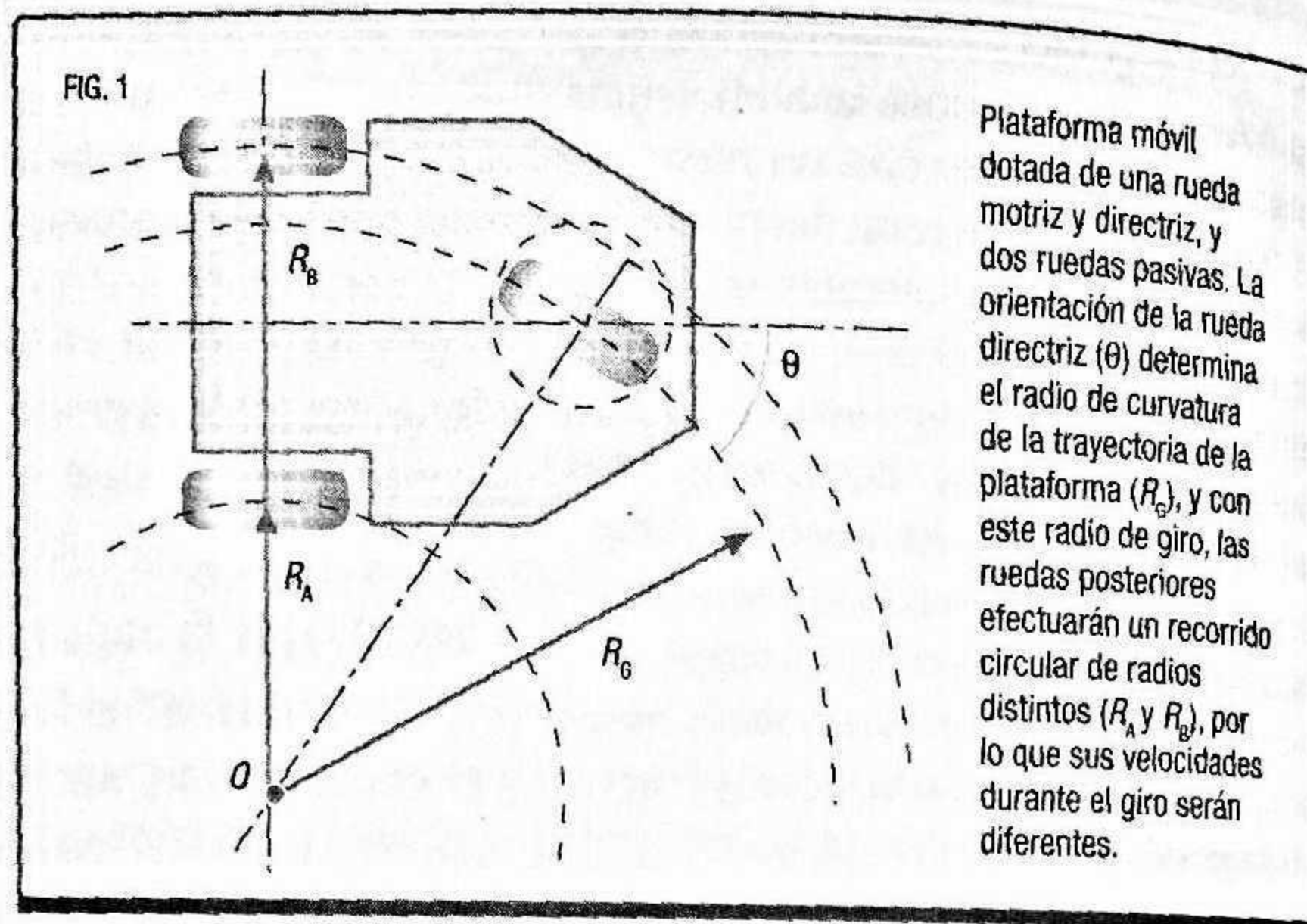
La movilidad sobre ruedas se puede conseguir con configuraciones muy variadas, tanto en la distribución de la tracción como en la disponibilidad de ruedas fijas y ruedas orientables. En cuanto al número de ruedas, las configuraciones más habituales son las constituidas por dos, tres, cuatro o seis ruedas.

La plataforma móvil sobre tres ruedas constituye la forma más simple de conseguir la movilidad necesaria para efectuar un desplazamiento con dos parámetros: velocidad —de avance o retroceso— y dirección. Para ello puede asignarse a una de las ruedas tanto la función de rueda tractora como directriz, como se muestra en la figura 1. Puede observarse que la orientación θ de la rueda directriz determina el radio de curvatura R_c de la trayectoria de la plataforma, y que con este radio de giro las ruedas posteriores efectuarán un recorrido circular de radios R_A y R_B distintos, por lo que durante el giro sus velocidades también serán distintas. Para admitir estas diferencias de velocidades, estas ruedas posteriores pueden ser pasivas, esto es, podrán girar libremente para hacer el recorrido impuesto por la rueda tractora y directriz.

Esta plataforma posee dos actuadores —tracción y dirección—, que le permiten efectuar trayectorias con dos grados de libertad, pero la plataforma puede utilizar los dos grados de libertad para posicionarse con tres grados de libertad, los dos que le permitan alcanzar cualquier punto (x, y) de un espacio bidimensional, y el de poder orientarse en cualquier dirección, pero con restricciones. La plataforma podrá desplazarse de un punto a otro con una orientación determinada, pero realizando las trayectorias y maniobras que sean necesarias.

La gran diferencia entre la magia y la imitación científica de la vida es que la primera se conforma con copiar la apariencia externa, mientras que la segunda se preocupa más por el funcionamiento y el comportamiento.

WILLIAM GREY WALTER



Con esta configuración motriz, al alcanzar el punto final en una orientación predeterminada, el vehículo no podrá variar su orientación —para hacerlo tendría que realizar la maniobra necesaria—. Cuando un robot móvil tiene la propiedad de poder modificar su orientación sin tener que efectuar un desplazamiento se denomina *holonómico*.

Otra configuración de la forma de locomoción mediante tres ruedas podría ser la de disponer de dos ruedas tractoras y una rueda pasiva. En este caso, la tracción se efectúa mediante la cooperación de los dos actuadores de las dos ruedas, y la dirección se consigue igualmente con los dos actuadores, controlando la diferencia de velocidades entre las dos ruedas tractoras. Cuando estas velocidades sean idénticas, se producirá un mismo avance en ambas ruedas, por lo que la trayectoria será rectilínea; en caso contrario la trayectoria será curva. Pero la orientación de la rueda pasiva (θ en la figura 1) vendrá definida por la trayectoria que determinan las diferencias de velocidades entre ambas ruedas motrices, por lo que su orientación deberá ser igualmente pasiva. La solución clásica que ofrece la mecánica para conseguir esta flexibilidad es la rueda pivotante (figura 2), que dispone de un eje de giro situado a una determinada distancia del punto

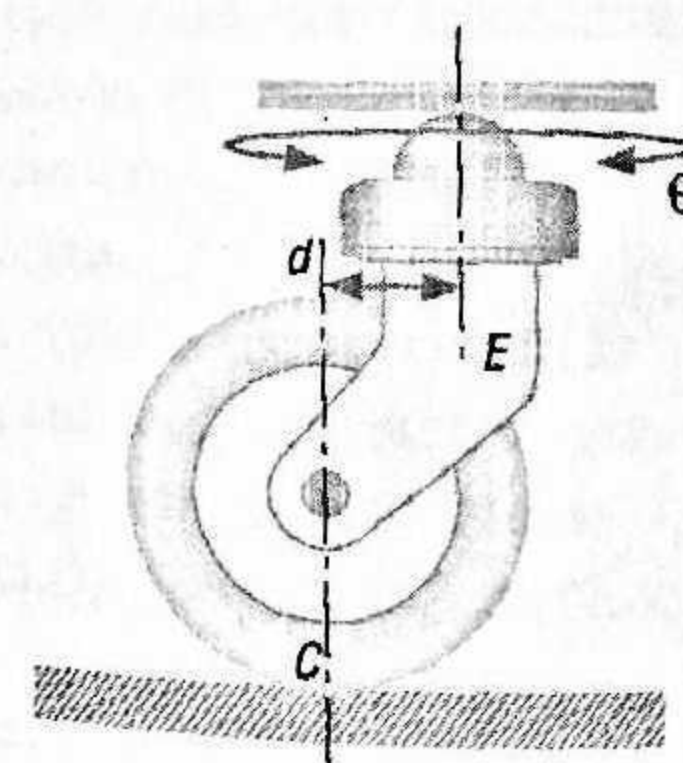
de contacto. Este mecanismo, que se denomina *cáster*, permite la orientación libre de la rueda. En la figura 3, se muestra una plataforma con una rueda con cáster pasiva.

El control independiente de la velocidad de las dos ruedas motrices permite controlar tanto el avance como el giro de la plataforma sobre sí misma si sus velocidades son iguales en magnitud pero tienen sentidos opuestos, por lo que esta plataforma será holonómica. Con los dos actuadores sigue disponiendo de dos grados de libertad al efectuar la trayectoria: el avance y la dirección, pero podrá posicionarse con tres grados de libertad: la posición y la orientación.

Las plataformas dotadas de tres ruedas son de gran simplicidad mecánica, pero su estabilidad puede resultar insuficiente, ya que su base de sustentación, la superficie delimitada por las ruedas que la soportan, queda muy reducida, como se observa en la figura 3. Por eso estas plataformas pueden complementarse con un mayor número de ruedas pasivas con cáster.

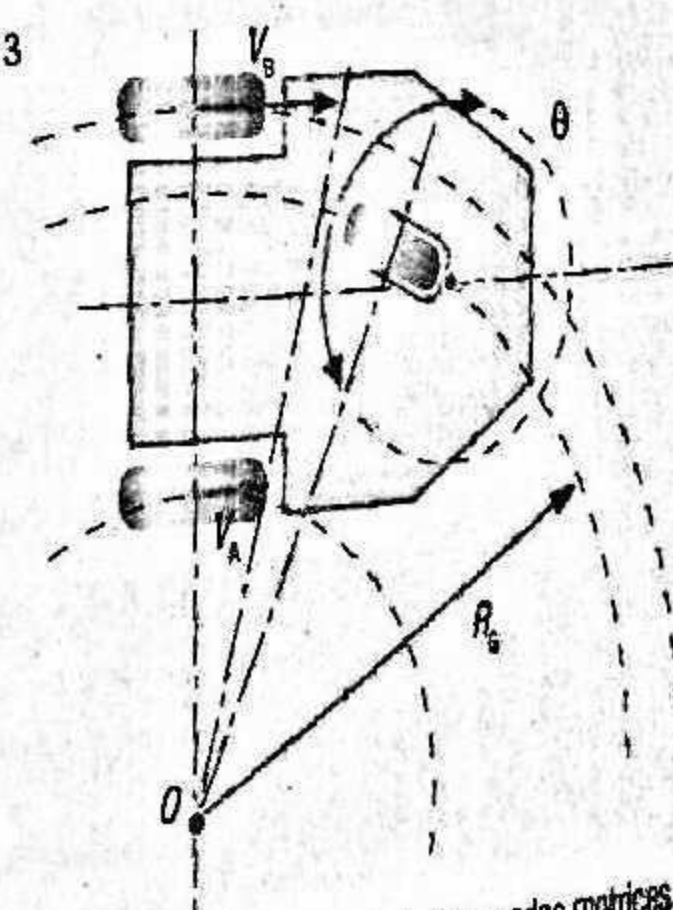
Si una plataforma prescinde de todas las ruedas pasivas de apoyo, quedando únicamente con las motrices, tenemos el robot de dos ruedas. En este caso se conserva la estabilidad lateral pero no la estabilidad en el eje longitudinal de avance, ya que la base

FIG. 2



Rueda pivotante autoorientable. La rueda se orienta libremente gracias al cáster, mecanismo formado por el eje de giro E situado a una distancia, d , de la línea en la que se halla el punto de contacto, C.

FIG. 3



Plataforma móvil dotada de dos ruedas motrices fijas y una rueda pasiva pivotante.

de sustentación queda reducida a la línea que une el punto de contacto de las dos ruedas con el suelo. Esta estabilidad puede conseguirse generando fuerzas inerciales, provocando aceleraciones o desaceleraciones que generan el par de fuerzas necesario para mantener el robot en equilibrio dinámico. Dado que el par generado es función de la altura del centro de masas del vehículo, cuanto mayor sea esta altura menor aceleración se requerirá para conseguir el mismo par de alineamiento vertical. Por otra parte, el par de caída disminuye a medida que el centro de gravedad se sitúa sobre la línea de sustentación, y sobre ella será nulo, en equilibrio inestable. Por ello, las aceleraciones para estabilizar el vehículo en torno a su posición de equilibrio son muy reducidas y resultan inapreciables. Analíticamente, el control de la estabilidad del vehículo corresponde a la cinemática de un péndulo invertido.

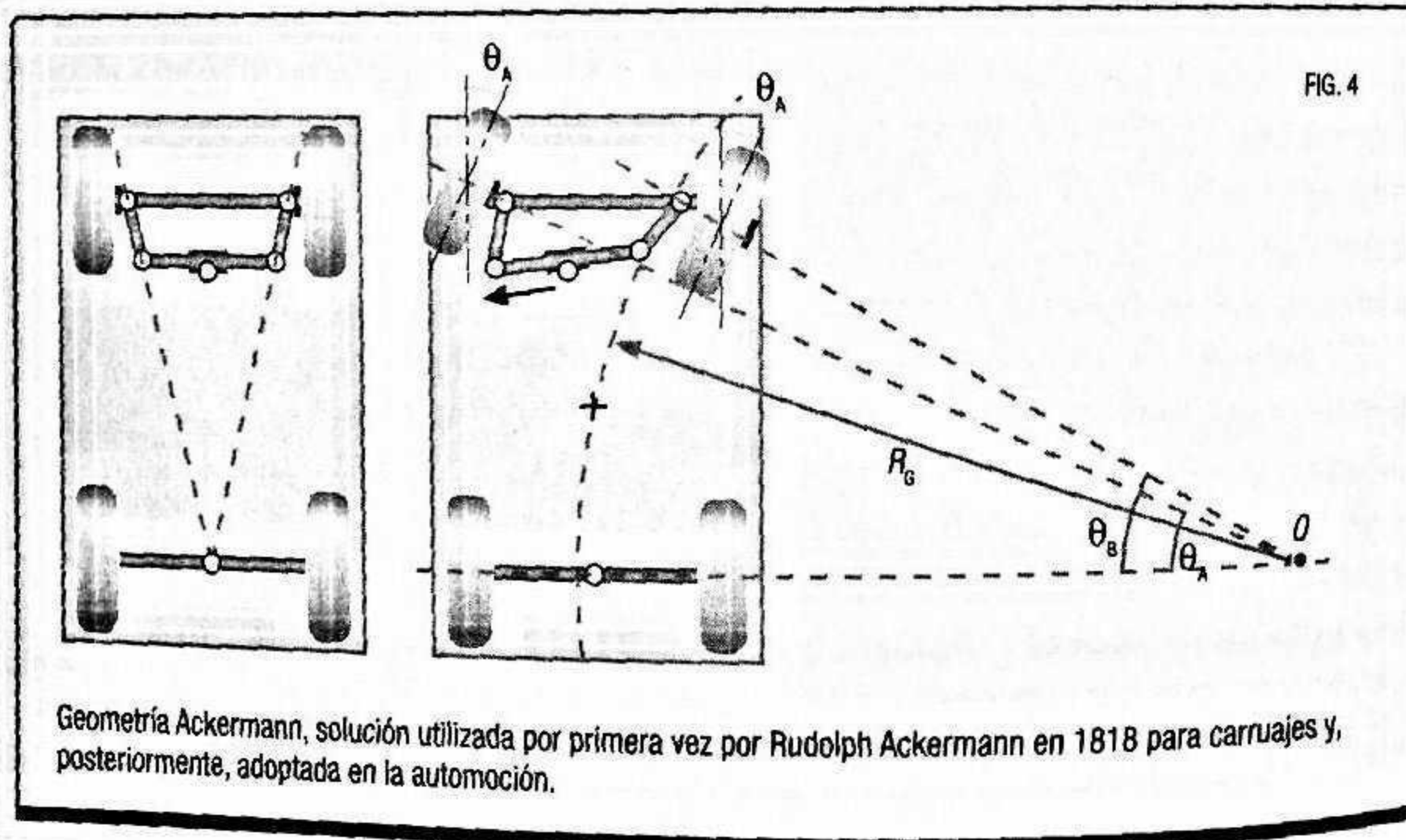
La configuración sobre cuatro ruedas es muy usual, dado que proporciona suficiente estabilidad. En este caso, la dirección ya no puede conseguirse controlando la orientación de una única rueda, sino que deben controlarse al menos dos de ellas, como muestra la figura 4. Esta configuración es la que se emplea en automoción. La ejecución de una trayectoria con un giro de radio R_G implica tener que determinar geoméricamente dos ángu-

los distintos de orientación, θ_A y θ_B . Para conseguir controlar la dirección con una única consigna (el volante en los automóviles) existen dos soluciones, una mecánica y otra electrónica. La solución mecánica consiste en disponer las ruedas directrices sobre una estructura articulada, denominada *geometría Ackermann*, que consigue que los radios de giro de las cuatro ruedas converjan en un centro de giro común.

La solución electrónica consiste en motorizar la orientación de cada una de las ruedas directrices y servocontrolar su orientación para cada radio de giro, de forma que el centro de giro O sea común.

En estas plataformas dotadas de cuatro ruedas puede ejercerse la tracción mediante un actuador único o utilizar una tracción distribuida disponiendo de un motor independiente en cada rueda, teniendo en cuenta que si la trayectoria no es rectilínea, la velocidad de cada rueda deberá ser proporcional a su radio de giro. Cuando se dispone de un motor único, como en el caso de la automoción convencional, la tracción no puede acoplarse rígidamente sobre dos o más de las ruedas sin efectuar la compensación de velocidades en las trayectorias curvas. Para ello, también existe una solución mecánica, el *mecanismo diferencial*, conocido desde la antigüedad, que consiste en un sistema de distribución de la rotación sobre dos ejes acoplados mediante un juego de engranajes planetarios, que consigue distribuir el giro en ambas ruedas admitiendo diferencias de velocidad entre ellas, de forma que un aumento en una de ellas produce un decremento equivalente en la opuesta.

Los robots de seis ruedas surgen de la necesidad de poder salvar obstáculos de un tamaño superior al que pueden superar los vehículos de cuatro ruedas. La capacidad de salvar un obstáculo (figura 5) viene determinada por el par que produce la fuerza de avance F_A al incidir sobre un obstáculo de altura h . El par de elevación que se produce es el producto de la fuerza incidente F_A por la distancia a al eje de giro. Si este par es mayor que el que produce en sentido inverso, que será el peso P soportado por la rueda por la distancia d al punto de contacto, el robot podrá superar el obstáculo. Si la altura del obstáculo fuera la del radio



Geometría Ackermann, solución utilizada por primera vez por Rudolph Ackermann en 1818 para carruajes y, posteriormente, adoptada en la automoción.

de la rueda, el par de elevación se reduciría a cero, ya que la distancia a del eje al escalón sería nula.

El uso de seis o más ruedas proporciona al robot una mayor tolerancia a las irregularidades del terreno si estas ruedas disponen de capacidad individual de adaptación vertical. Una de las configuraciones más características es disponer de un conjunto de dos de ellas montadas sobre un bastidor basculante, tal como muestra la figura 6. Esta disposición basculante permite posicionarse frente a un obstáculo cuya altura puede superar ampliamente el radio de las ruedas. De esta forma, con robots de muy pequeñas dimensiones se consigue salvar obstáculos que con ruedas convencionales requerirían unas dimensiones mucho mayores. El robot Pathfinder de la NASA, el primer robot que exploró Marte, popularizó esta arquitectura.

Estas plataformas multirrueda pueden disponer de orientación para cada rueda o, para mayor simplicidad, pueden prescindir de ella. Para conseguir variar la dirección de avance se controlan las velocidades de las ruedas de uno u otro costado, como si de una tracción oruga se tratase.

Los robots con ruedas de rodillos ofrecen nuevas posibilidades, ya que permiten el movimiento omnidireccional. Las ruedas convencionales presentan gran adherencia en el sentido de rotación,

ROBOTS TERRESTRES CON PATAS

Cuando el robot ha de desplazarse por superficies irregulares se recurre a las patas o a orugas, que permiten disponer de una mayor superficie de contacto y adaptarse a suelos accidentados o blandos, como la arena o la nieve.

Las patas de un robot: arquitectura y número

Para que una pata pueda realizar el movimiento de avance requiere un mínimo de dos grados de libertad, el de avance y el de elevación. Estas patas pueden implementarse mediante una arquitectura cartesiana —constituida por dos desplazamientos, en altura y en avance-retroceso— o mediante una arquitectura polar basada en un giro en el plano vertical de avance y un desplazamiento vertical. Para evitar el uso de actuadores lineales, se prefiere usar una arquitectura de coordenadas angulares que permita el desplazamiento en el plano vertical. Pero esto requiere tres grados de libertad, como muestra la figura. Ese grado de libertad adicional permite a las patas avanzar en el plano vertical a diferentes distancias del cuerpo, lo que hace más fácil planificar la posición de los pies entre los posibles obstáculos. La aplicación y el entorno de operación determinan el número de patas más conveniente. La arquitectura de seis patas es habitual para entornos complejos, y garantiza una continua estabilidad al andar gracias al apoyo simultáneo de tres patas. Con cuatro patas se logra la estabilidad de forma dinámica, con las fuerzas inerciales. El reto de mantener el equilibrio con una estructura bípeda se superó gracias al interés en el desarrollo de robots humanoides.

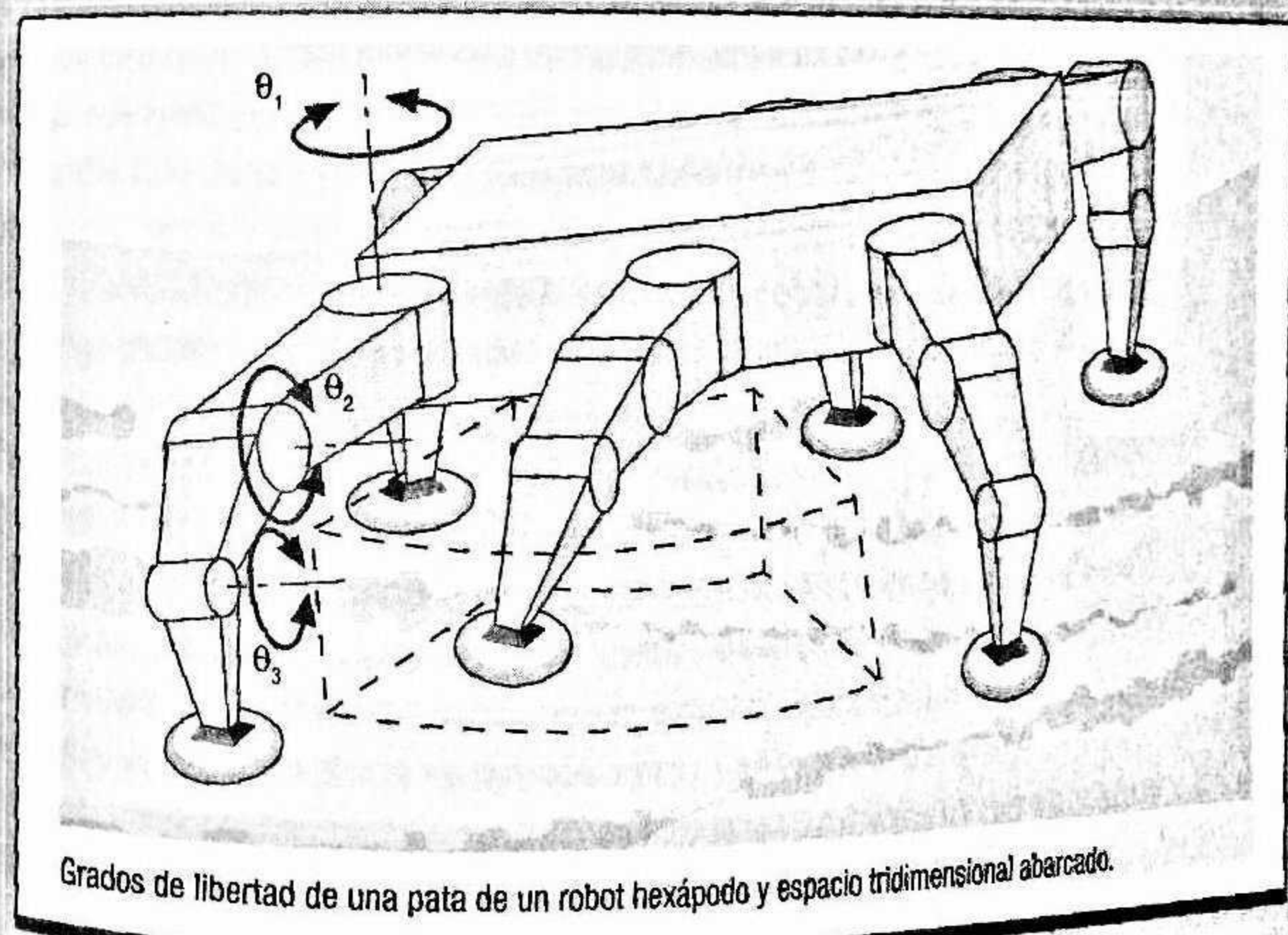
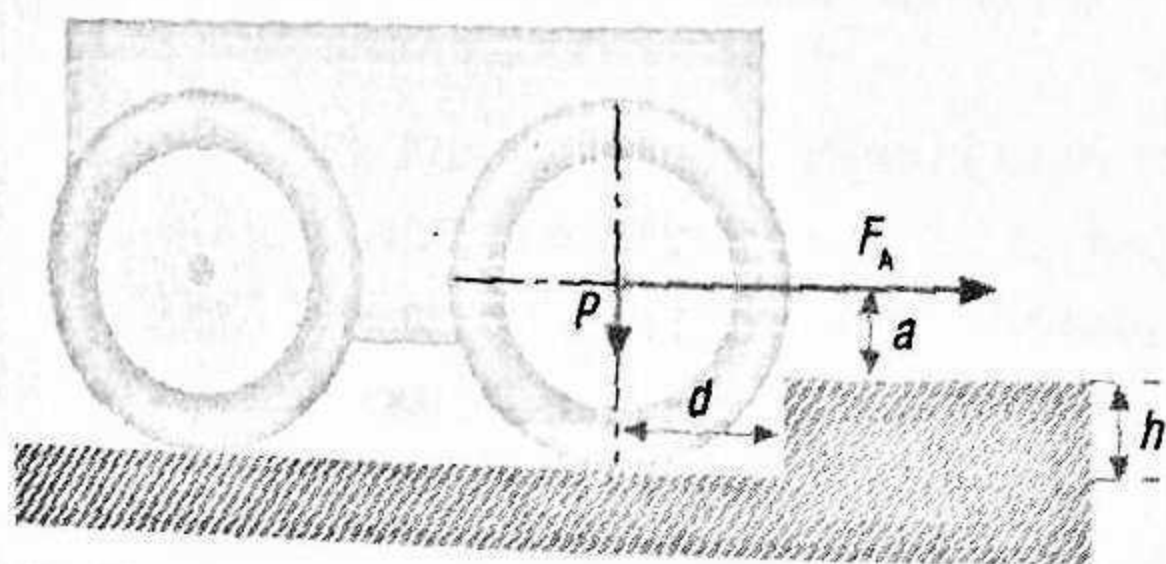
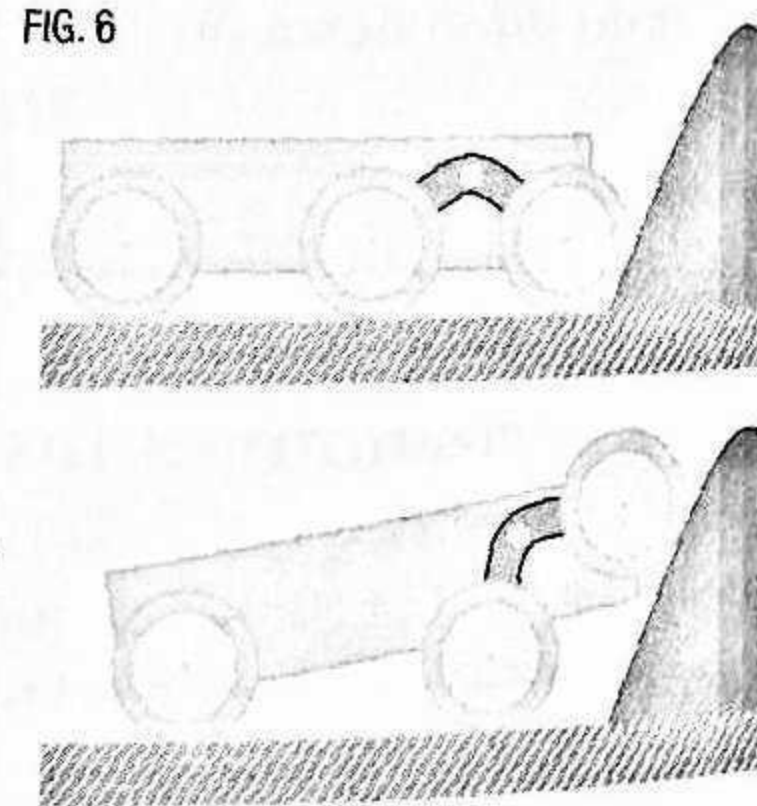


FIG. 5



La capacidad de superar un obstáculo viene dada por la fuerza de avance F_A y por la distancia a del eje sobre el obstáculo.

FIG. 6



Arquitectura de pares de ruedas basculantes para poder superar mayores obstáculos.

lo que permite transmitir la tracción, y también adherencia transversal, lo que evita el desplazamiento transversal. Pero las ruedas con rodillos solo presentan adherencia en el sentido de la rotación.

En la plataforma estas ruedas no pueden situarse de forma que todos sus rodillos estén en planos paralelos, porque no habría adherencia en el sentido perpendicular al plano de los rodillos.

Para evitar esta pérdida de adherencia se pueden disponer o bien tres ruedas situadas a 120° o bien cuatro ruedas a 90° . De esta forma, controlando la velocidad de cada rueda se produce un vector de tracción en el sentido del eje de rotación de los rodillos, y el vector resultante del movimiento de todas las ruedas determinará la velocidad y dirección de la plataforma, siendo, pues, omnidireccionales. Para poder situar las ruedas a ambos lados del vehículo, en planos paralelos, se requerirán ruedas con rodillos oblicuos. Estos vehículos tienen la ventaja de poseer tres grados de libertad, ya que pueden controlar independientemente tanto el avance en cualquier dirección como su orientación, rotando sobre sí mismos tanto durante el desplazamiento como cuando están estacionados.

El problema que se presenta para el control de los robots móviles es, por una parte, el de poder disponer de sensores de posición con suficiente precisión para conseguir la navegación y el posicionado con un error lo bastante pequeño. Por otra parte, se debe resolver la algorítmica necesaria para fusionar la información obtenida de múltiples sensores, teniendo en cuenta que cada uno de ellos comporta una cierta deformación del espacio percibido. El sensor de orientación más utilizado es el compás magnético, que permite obtener la posición angular con precisiones del orden de 1° .

En cuanto a la posición, los GPS actuales permiten obtenerla con errores de 15 m; esto puede ser suficiente para algunas aplicaciones, pero normalmente se requieren mayores precisiones. Para ello se recurre al GPS diferencial, que permite obtener precisiones de hasta 2 cm, lo que ya resulta adecuado para muchas aplicaciones en exteriores. En interiores, donde la recepción GPS es problemática, se recurre a elementos auxiliares de referencia y a sensores láser de barrido para la localización precisa basada en la reconstrucción tridimensional del entorno, como complemento de la odometría.

Robots submarinos

Un segundo tipo de robots móviles lo constituyen los robots submarinos, que pueden ser autónomos o teleoperados. Su espacio de operación es tridimensional, y pueden posicionarse en él con los seis grados de libertad de posición y de orientación.

Los robots submarinos autónomos (AUV, de *Autonomous Underwater Vehicles*) están concebidos para efectuar largas misiones tales como exploraciones batimétricas, levantamientos topográficos o seguimiento de cables. Para realizar estos largos recorridos con un reducido consumo de energía se utilizan diseños muy aerodinámicos que logran una navegación muy eficiente. Ello ha llevado a utilizar estructuras tipo torpedo, utilizando uno o más propulsores y timones.

Estos robots disponen de tres grados de libertad, correspondientes al avance y a los giros en los planos vertical y horizontal, que les permiten alcanzar cualquier punto del espacio tridimensional mediante el cálculo de la trayectoria adecuada.

El control de la trayectoria de un robot submarino exige disponer de sensores de posición, pero en el fondo marino no se produce la propagación radioeléctrica, por lo que se utilizan sistemas de posicionado basado en sensores inerciales, y el GPS cuando se navega en superficie o en salidas ocasionales para efectuar un reposicionamiento absoluto. Por otra parte, el robot estará dotado de los sensores necesarios para realizar la misión asignada, ya sean sensores batimétricos, de salinidad o de temperatura, además de las cámaras para la obtención de imágenes.

Los robots submarinos teleoperados (ROV, de *Remote Operated Vehicle*) están concebidos para efectuar tareas de observación o actuación en entornos concretos, tales como plataformas petrolíferas, de recuperación o trabajos en cables submarinos. Estos robots están unidos al buque nodriza mediante un cable umbilical que les proporciona la energía y un canal de comunicaciones de banda ancha, lo que solventa la falta de comunicación submarina vía radio.

Para realizar estas tareas en entornos generalmente restringidos, estos robots deben disponer de mayor maniobrabilidad

que los robots autónomos. Para ello suelen estar dotados de seis grados de libertad, proporcionados por seis o más propulsores distribuidos en diferentes orientaciones para conseguir el movimiento en los tres ejes del espacio y poder maniobrar con los ángulos de inclinación y orientación necesarios. Estos robots disponen de cámaras para la obtención de imágenes bidimensionales o tridimensionales y, según la aplicación, pueden disponer de uno o dos brazos teleoperados.

Para efectuar el control en posición y orientación se utilizan sensores de campo magnético de tres ejes, que permiten obtener los tres ángulos de orientación en el espacio. Para conseguir la estabilización en posición se utilizan sensores inerciales complementados mediante sensores acústicos.

Robots aéreos

El tercer tipo de robots móviles lo constituyen los robots aéreos, que operan en un espacio de trabajo tridimensional, igual que los submarinos, y también pueden posicionarse con los seis grados de libertad. Estos robots navegan en el aire básicamente sustentados mediante alas o mediante la fuerza de propulsores.

Los robots aéreos dotados de alas son aviones convencionales no tripulados orientados a cubrir grandes distancias y espacios. Su propulsión puede efectuarse con un motor de combustión interna, que posee una relación muy favorable entre el peso del motor más el combustible y la distancia que puede recorrer. También se han desarrollado prototipos alimentados con energía solar mediante paneles fotovoltaicos, orientados a exploraciones de larga duración.

Los robots aéreos están dotados de los instrumentos de navegación habituales, además de las cámaras para la toma de imágenes. Respecto a su control, pueden estar teleoperados o realizar misiones de forma autónoma. Los autónomos se conocen como UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Los teleoperados se denominan RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), aunque también se utiliza la sigla UAV, interpretando que no están tripulados. Ambos tipos,

al ser no tripulados, pueden ser de estructura muy ligera y de reducidas dimensiones, lo que facilita su maniobrabilidad con tres grados de libertad. Estos grados de libertad corresponden al avance y a los cambios de rumbo y de altura mediante los timones de cola. Estos tres grados de libertad permiten alcanzar cualquier punto del espacio tridimensional.

La sustentación de los robots aéreos dotados de alas está basada en la velocidad de avance, por lo que sus misiones se realizan en pleno vuelo.

Para aplicaciones donde es necesario un estacionamiento en el aire se utilizan robots dotados de rotores con hélices verticales. Los vehículos dotados de un solo rotor de sustentación, similares a los helicópteros, consiguen cuatro grados de libertad, el avance en sentido longitudinal y también transversal, el desplazamiento en elevación y el giro sobre su eje. Los tres primeros grados de libertad se consiguen mediante el rotor principal, dotado de palas de paso variable. Estas pueden variar el flujo, produciendo una inclinación del vector fuerza en cualquier orientación, lo que provoca el avance en una u otra dirección. La rotación sobre su eje se consigue con el rotor auxiliar, que permite la compensación del par de giro provocado por el rotor principal.

El control de la trayectoria de los vehículos aéreos mediante palas de paso variable comporta una gran complejidad mecánica. Esta complejidad puede evitarse utilizando múltiples propulsores verticales, de forma que controlando individualmente su potencia lo que se consigue no es variar el ángulo de orientación de este vector fuerza de sustentación resultante, sino su posición respecto al centro de gravedad, consiguiéndose el mismo efecto. Actualmente este tipo de vehículos, los drones, se han popularizado por su bajo coste y altas prestaciones. Su miniaturización ha conseguido una autonomía suficiente mediante baterías de reducido peso, lo que ha permitido reducir su coste.

Por otra parte, el sistema de navegación incorporado, constituido por el microprocesador y los sensores de posición y orientación en el espacio, permite disponer de un dispositivo de mando para el control remoto que traduce las órdenes cartesianas dadas por el operador a las consignas de los distintos rotores, cuatro,

seis o más. Esta unidad de control permite convertir en gobernable un sistema de propulsión que sería imposible de controlar actuando manualmente de forma directa sobre cada propulsor.

LA ROBÓTICA INTELIGENTE

El éxito de la robótica en el siglo XXI está ligado al progreso de la inteligencia artificial, porque además de velocidad, precisión y fiabilidad también debe ofrecer capacidad de cooperar con las personas, de adaptarse a entornos no estructurados y complejos, y de aprender para mejorar continuamente su comportamiento sin intervención humana.

En aplicaciones en las que, por su complejidad, no es posible dotar al robot de la inteligencia suficiente para actuar con autonomía, la alternativa es recurrir a sistemas teleoperados, en los que la inteligencia la aporta el operador. Esta modalidad tampoco exime a los robots de la necesidad de disponer de capacidades inteligentes propias, pues para que una persona sea eficiente en la estación de mando o de guiado, debe recibir la ayuda inteligente necesaria para convertir en fáciles tareas difíciles de realizar.

Las bases de la inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) es una disciplina que forma parte de la informática y que se dedica al desarrollo de los algoritmos que permiten a una máquina tomar decisiones inteligentes, comportándose como si tuviese una inteligencia semejante a la humana. El comportamiento inteligente implica la percepción y la capacidad de interpretación, el razonamiento, el aprendizaje y el conocimiento, la planificación y la capacidad de decisión.

Sin percepción ni información del entorno no es posible un comportamiento inteligente. Los sistemas de percepción más relevantes en robótica son la visión por computador y el procesamiento de imágenes, la percepción ultrasónica, los sistemas de localización, la fuerza y el tacto. Por otra parte, cada aplicación

requerirá disponer de sensores específicos, tales como sensores magnéticos, químicos o biológicos y fisiológicos.

La visión por computador y el procesamiento de imágenes se emplean para el reconocimiento del entorno, el posicionado, el reconocimiento de formas y la modelización de los objetos a manipular. La percepción ultrasónica proporciona medidas puntuales de profundidad, o median-

te un barrido, imágenes bidimensionales de gran utilidad en medicina y robótica submarina. Los sistemas de localización, de especial importancia en robots móviles, pueden ser el GPS, los sistemas basados en láser, los ultrasonidos y la visión. Los sensores de fuerza son necesarios para

interaccionar de forma segura, tanto para el robot como para los elementos del entorno. El tacto, a través de la piel artificial, podrá proporcionar al robot información sobre la morfología de los objetos aprehendidos y la forma adecuada de sujetarlos.

Estos datos numéricos pueden corresponder a magnitudes, datos o imágenes bidimensionales, o a información en un espacio tridimensional o de más dimensiones. Para desarrollar un comportamiento inteligente no es suficiente con disponer de esta información, sino que también es necesaria su correcta interpretación. Un claro ejemplo de ello es el poder discriminar entre una sombra y un obstáculo en una imagen frontal de un vehículo móvil.

La correcta interpretación de la información multisensorial constituirá una parte muy relevante del conjunto de funciones que comporta alcanzar un comportamiento inteligente.

El razonamiento, en el contexto de la robótica y la tecnología, consiste en establecer relaciones entre datos, ya sean de tipo matemático y lógico o basadas en la experiencia y el contexto, para obtener como resultado una decisión.

El razonamiento más cartesiano es el que puede realizarse con el álgebra y el cálculo matemático, por ejemplo, mediante cálculos de máximos, mínimos o la optimización. El razonamiento ló-

La inteligencia artificial estudia la forma de conseguir que las computadoras hagan cosas que, por el momento, las personas hacen mejor.

ELAINE RICH Y KEVIN KNIGHT

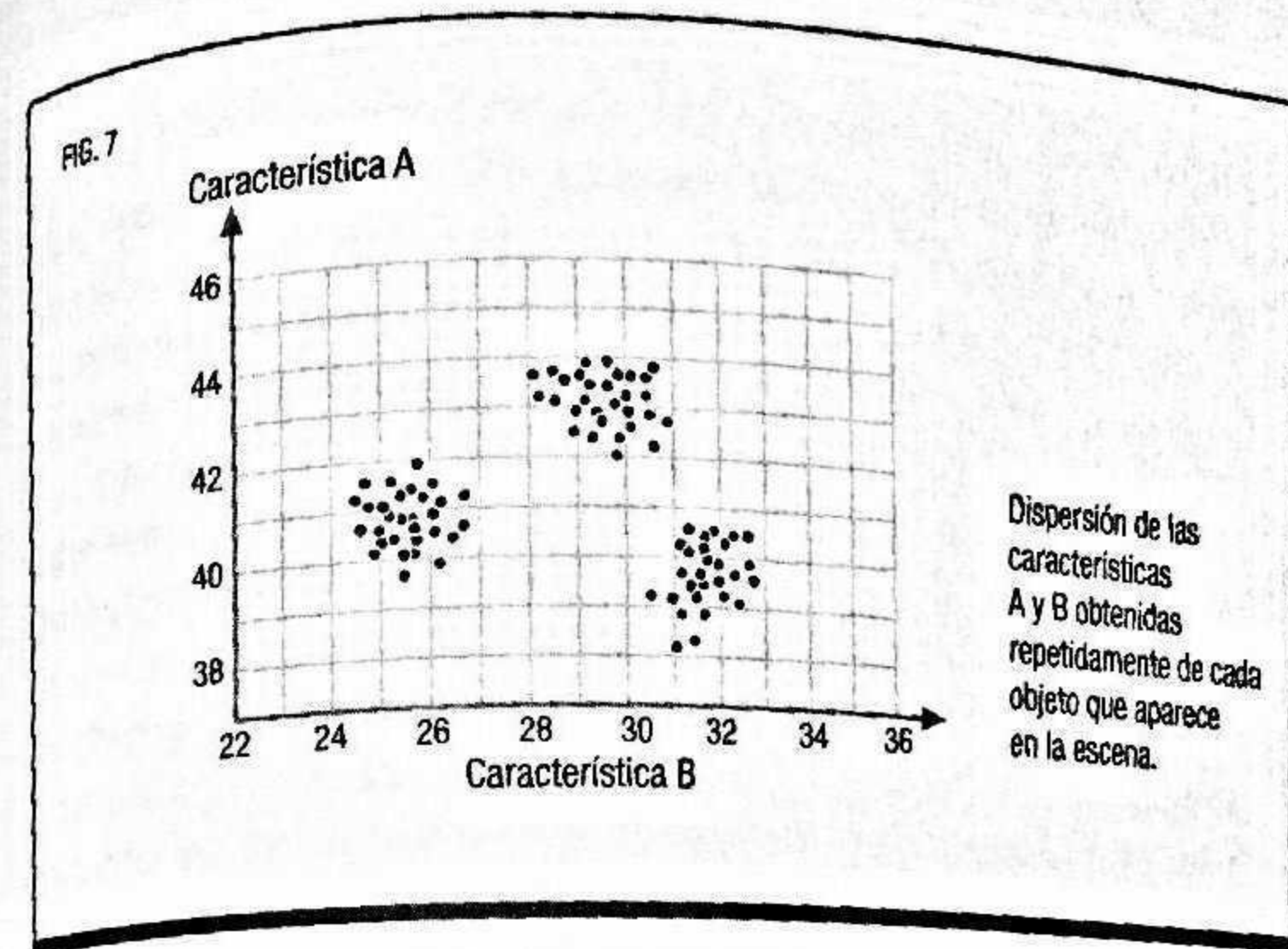
gico está basado en el álgebra de Boole, un álgebra construida sobre tres operaciones simples que operan con variables binarias. El razonamiento lógico también puede extenderse a variables no binarias cuando la información disponible no es de elevada precisión y es más cualitativa que cuantitativa. Un ejemplo son las señales con un gran nivel de ruido, como pueden ser las señales biomédicas, de las que solo es posible obtener magnitudes aproximadas. El razonamiento lógico puede complementarse con reglas de comportamiento basadas en las condiciones impuestas por el entorno o por las limitaciones cinemáticas del propio robot.

El razonamiento basado en la experiencia acumulada parte de la premisa de que si una determinada operación ha culminado satisfactoriamente repetidas veces, se asume que se ha tomado una decisión acertada. Otro tipo de razonamiento es el que se basa en el cálculo de probabilidades y la estadística.

La capacidad de razonamiento computacional resulta prácticamente ilimitada en cuanto a número de variables y también desde el punto de vista de la algorítmica basada en el álgebra y el cálculo. Pero las decisiones generadas mediante el razonamiento serán tanto más acertadas cuanto más fiable y precisa sea la información obtenida por los sistemas de percepción. Por otra parte, estas decisiones también estarán condicionadas por el modelo matemático que define el comportamiento del entorno.

Otra de las bases que sustenta la IA es el aprendizaje. Los sistemas informáticos necesarios para implementar la unidad de control disponen actualmente de gran capacidad de memoria, lo que permite incrementar las posibilidades de aprendizaje. El aprendizaje puede formar parte de todo un sistema de control inteligente, pero en muchos casos ya constituye por sí solo la base de un comportamiento inteligente. Así, por ejemplo, un robot dotado de un sistema de visión para localizar y clasificar piezas puede actuar por aprendizaje, ya sea asistido, cuando se precisa la ayuda de un operador, o autónomo.

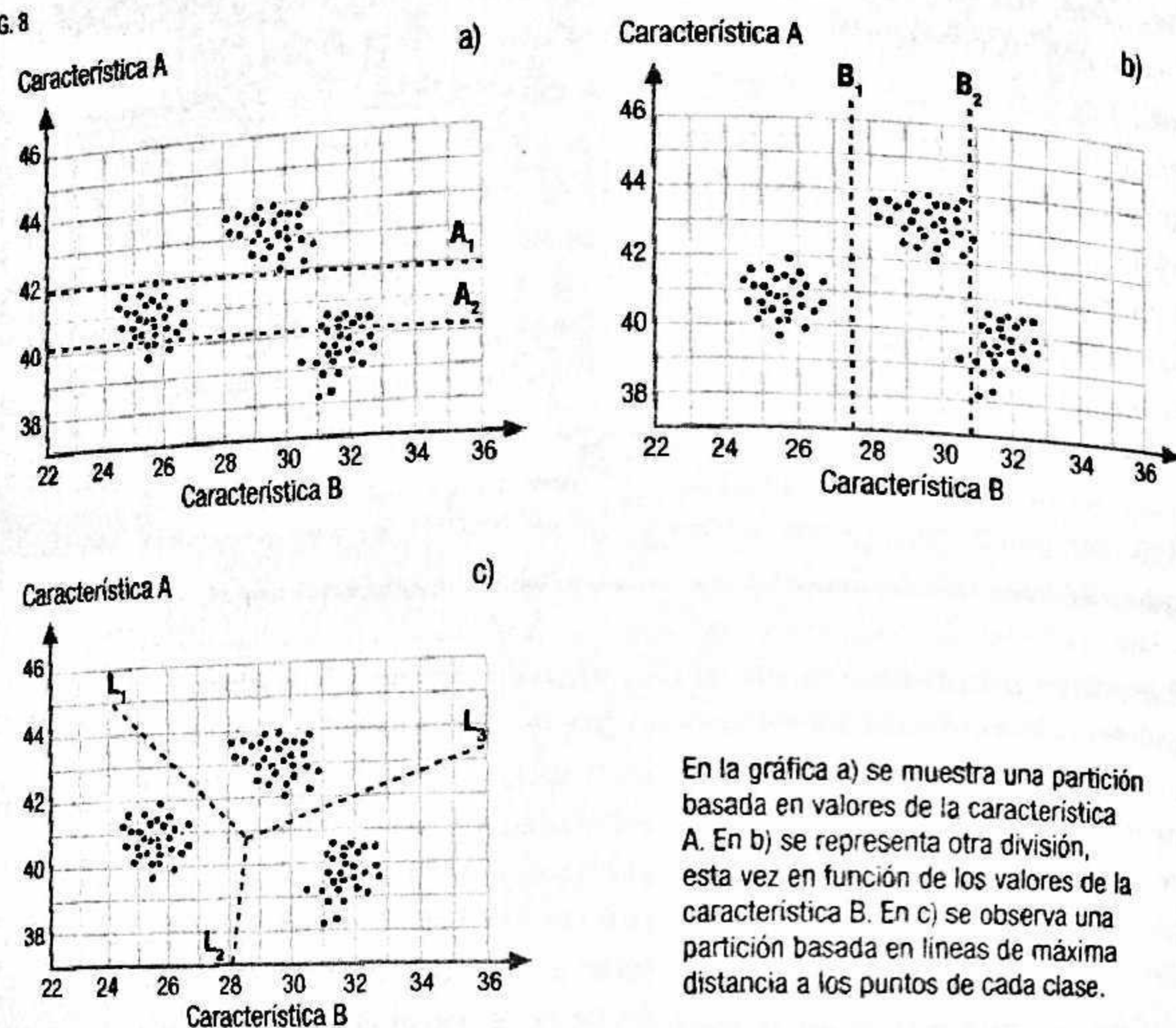
Focalizando el problema únicamente en el proceso de reconocimiento y selección, el aprendizaje se inicia con la extracción de distintas características geométricas de los objetos que aparecen en la escena, como podrían ser sus dimensiones (área visible),



su forma (por la relación entre dimensión máxima y mínima) y el número de perforaciones o número de salientes. De esta forma, cada objeto será representado por un conjunto de valores numéricos que podrán compararse con los valores considerados patrón, lo que permitirá tanto clasificarlos como detectar anomalías. Si, para mayor simplificación, consideramos solo dos de estas características, los datos obtenidos en sucesivas adquisiciones durante la etapa de aprendizaje pueden representarse en un plano bidimensional en el que las coordenadas serán los valores de estas dos características. Aun siendo idénticas las piezas, el sistema de percepción no proporcionará exactamente los mismos valores de estas características, por lo que se produce una cierta dispersión de los puntos que representan las dos características de cada pieza en este plano, como se indica en la figura 7.

Esta agrupación de los puntos obtenidos indica claramente la presencia de tres modelos de piezas distintos. Para proceder a su identificación, el sistema puede programarse manualmente, estableciendo las condiciones y límites en cada característica que permitan asociar cada conjunto de valores a un modelo de pieza, con la mayor fiabilidad posible. Pero el sistema puede estar dotado de un sistema de aprendizaje automático, de forma que el propio sistema sea capaz de detectar el número de mo-

FIG. 8



En la gráfica a) se muestra una partición basada en valores de la característica A. En b) se representa otra división, esta vez en función de los valores de la característica B. En c) se observa una partición basada en líneas de máxima distancia a los puntos de cada clase.

delos distintos y definir los algoritmos que permitan la correcta identificación de cada pieza con su modelo. Si el algoritmo de selección fuese el de establecer unos valores umbrales de las características A y B obtenidas, la programación puede resultar simple si se realiza manualmente, pero puede ser difícil conseguir una correcta selección, como puede observarse en las gráficas a) y b) de la figura 8.

El aprendizaje automático, al estar dotado de una elevada capacidad de cálculo, puede utilizar algoritmos que maximicen las distancias entre los puntos de los distintos modelos respecto a las líneas que efectúan la partición (gráfica c) de la figura). Pero, en este caso, todos los puntos del plano corresponden a una de

las tres regiones que delimitan estas tres líneas de partición calculadas. Así, un objeto claramente discordante, por estar alejado de las tres agrupaciones que se producen, quedará mal clasificado. En cambio, si las particiones realizadas son delimitadas mediante poligonales, un objeto con unos valores alejados de todos los modelos podrá ser clasificado de erróneo.

Mediante estos algoritmos de selección, los sistemas dotados de capacidad de aprendizaje efectúan el reconocimiento automático de forma óptima. Sin embargo, en situaciones reales de funcionamiento las condiciones de trabajo pueden variar, y pueden dejar de clasificar de forma óptima. Por ejemplo, el sistema de visión para localizar y clasificar piezas del ejemplo anterior puede proporcionar unos valores de las dos características A y B que varíen con el tiempo, ya sea debido al envejecimiento de las fuentes de iluminación, a la acumulación de polvo o a las variaciones luminosas día-noche. Esta eventualidad no es un imprevisto, sino que es esperable y debe estar considerada en un sistema inteligente. Para ello, esta primera fase de aprendizaje propiamente dicho no puede considerarse acabada, sino que seguirá de forma continua, adaptando progresivamente los límites calculados a las variaciones que puedan producirse.

Dada la gran disponibilidad de memoria en los sistemas informáticos actuales, todos los datos que se van generando durante la producción, en este caso el número de piezas de cada modelo, objetos desconocidos o errores producidos, son memorizados en una base de datos. Estos datos, complementados con los obtenidos por otros equipos, constituyen la base del conocimiento de este sistema productivo. Esta información, analizada en su conjunto, es una valiosa herramienta para la mejora continua del proceso de producción.

La planificación también es una capacidad esencial en la inteligencia artificial, y tiene por objeto generar, a partir de unas especificaciones del estado inicial y del objetivo que se desea alcanzar, un conjunto de acciones con una estrategia que permita lograr este objetivo de forma óptima. Con esa información, dispondrá de una base de datos con las características físicas de los recursos de que dispone, las limitaciones del entorno y un con-

junto de acciones preestablecidas. El planificador deberá seleccionar y concatenar el conjunto de acciones preestablecidas más adecuadas para fijar el plan de acción. En caso de no disponer de una base de datos con un conjunto de acciones preestablecidas, el sistema puede llegar a generarlas por aprendizaje, pero este proceso puede no ser tan eficiente como cuando esas acciones son fruto del conocimiento y la experiencia de un profesional.

El plan de acción elaborado por el planificador generalmente no es de solución única, por lo que también deberá valorar cada solución generada según unos criterios de coste preestablecidos (tiempo de ejecución, gasto de material o de energía... La toma de decisiones consiste en la elección de una opción de entre las disponibles o elaboradas, que satisfaga el problema planteado y que optimice una función derivada de unos criterios generales predeterminados.

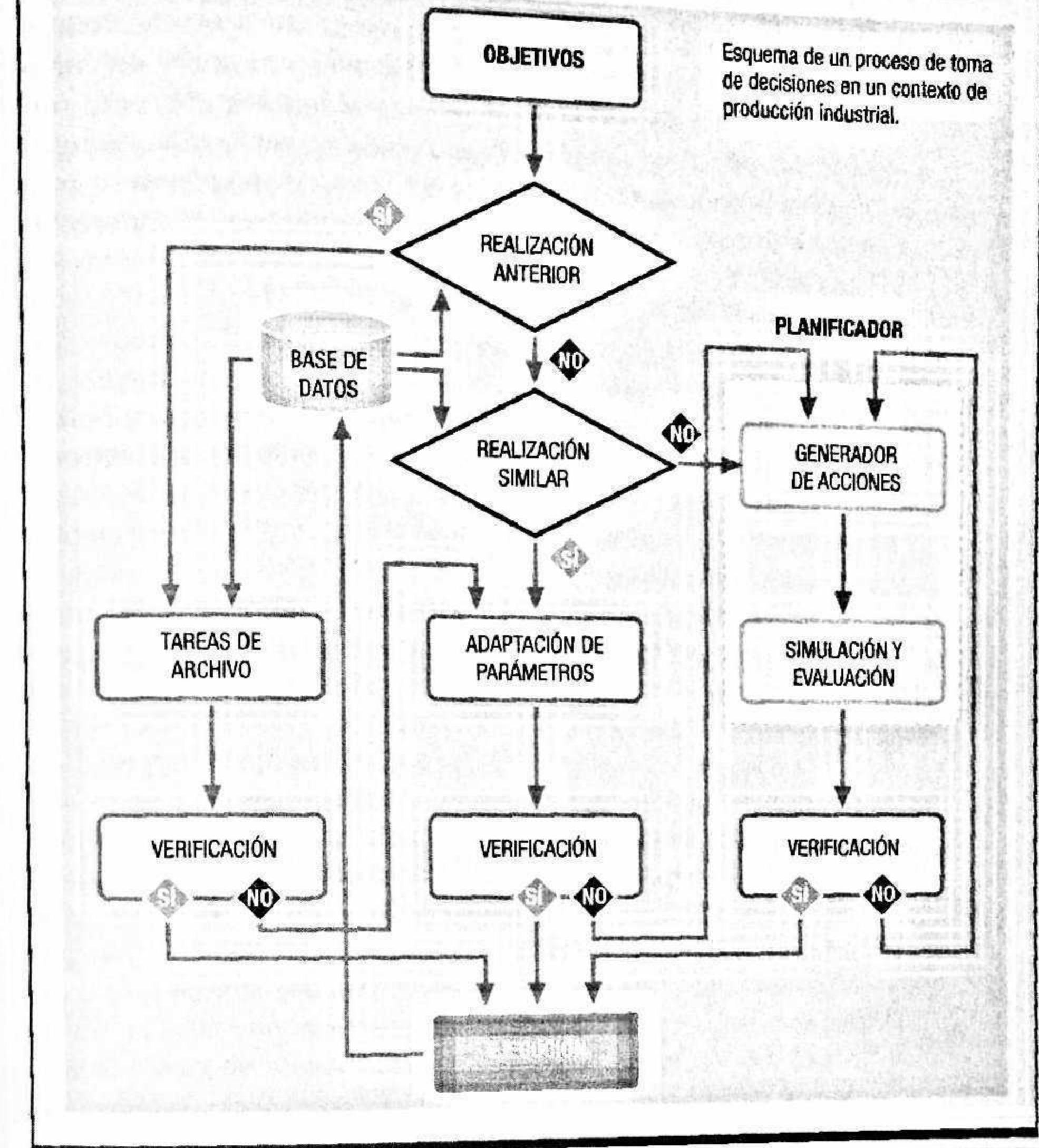
Primero, el sistema de toma de decisiones valorará si el conjunto de acciones que llevan al objetivo propuesto han sido realizadas anteriormente, en cuyo caso se limitará a verificar que con los datos disponibles sigue siendo posible alcanzar el objetivo final propuesto (figura 9). Si no es posible —debido, por ejemplo, a un cambio de las condiciones del entorno—, el sistema analizará si dispone de datos de tareas realizadas con objetivos similares. En este caso el planificador adaptará los parámetros de las acciones que permitan alcanzar el objetivo. Finalmente, para lograr un nuevo objetivo el planificador elegirá de la base de datos el conjunto de acciones —compatibles con los recursos disponibles— que conduzcan al objetivo final previsto, o elaborará las acciones complementarias aún no disponibles en la base de datos.

En todos los casos, este sistema realiza una verificación de las decisiones seleccionadas mediante simulación y evaluación, para efectuar los ajustes necesarios antes de su ejecución.

La robótica inteligente en el campo de los servicios

El comportamiento inteligente en robótica se pone claramente de manifiesto en sus aplicaciones en el campo de los servicios,

FIG. 9



dado que el entorno es mucho más cambiante y menos definido que en el sector industrial. La inteligencia artificial en este campo deberá afrontar los objetivos que comporta cada aplicación, efectuando la planificación de acciones de forma conti-

nua y en tiempo real, adaptándose continuamente a un entorno dinámico.

Los retos más usuales a los que se enfrenta la inteligencia artificial en este sector son: la navegación segura sobre un entorno no conocido o desconocido; detectar e identificar elementos del entorno, tanto para su interacción como para planificar la navegación; la cooperación con otros robots cuando la tarea se lleva a cabo por un conjunto de ellos, y compatibilizar el espacio de operación con la presencia de personas, cuya actitud puede ser de cooperación o de obstaculización.

La navegación en un entorno conocido implica la planificación óptima de trayectorias y la evasión de obstáculos estáticos o dinámicos. Cuando el entorno es desconocido, el robot efectúa la navegación buscando los espacios libres mediante los sensores de entorno disponibles, generando simultáneamente un mapa del entorno durante sus recorridos (SLAM, de *Simultaneous Localization and Mapping*).

La cooperación multirrobot implica una distribución dinámica de tareas en función de las disponibilidades reales de cada uno de ellos, manteniendo tanto el objetivo final fijado como la optimización de los recursos disponibles.

La robótica que opera en un entorno con personas, como la limpieza robotizada del suelo de grandes superficies, aeropuertos y vías públicas o la prestación de servicios en ferias, exposiciones, hoteles u hospitales (véanse las fotografías de la página 145), debe resolver con absoluta fiabilidad tanto la navegación como la interacción cuando la aplicación lo requiera. Dado que las reacciones y el comportamiento humanos, por ser inteligentes, son muy imprevisibles, se requiere una gran capacidad de planificación y percepción e interpretación del entorno. El planificador debe contemplar reacciones humanas coherentes, así como reacciones no cooperativas e incluso hostiles.

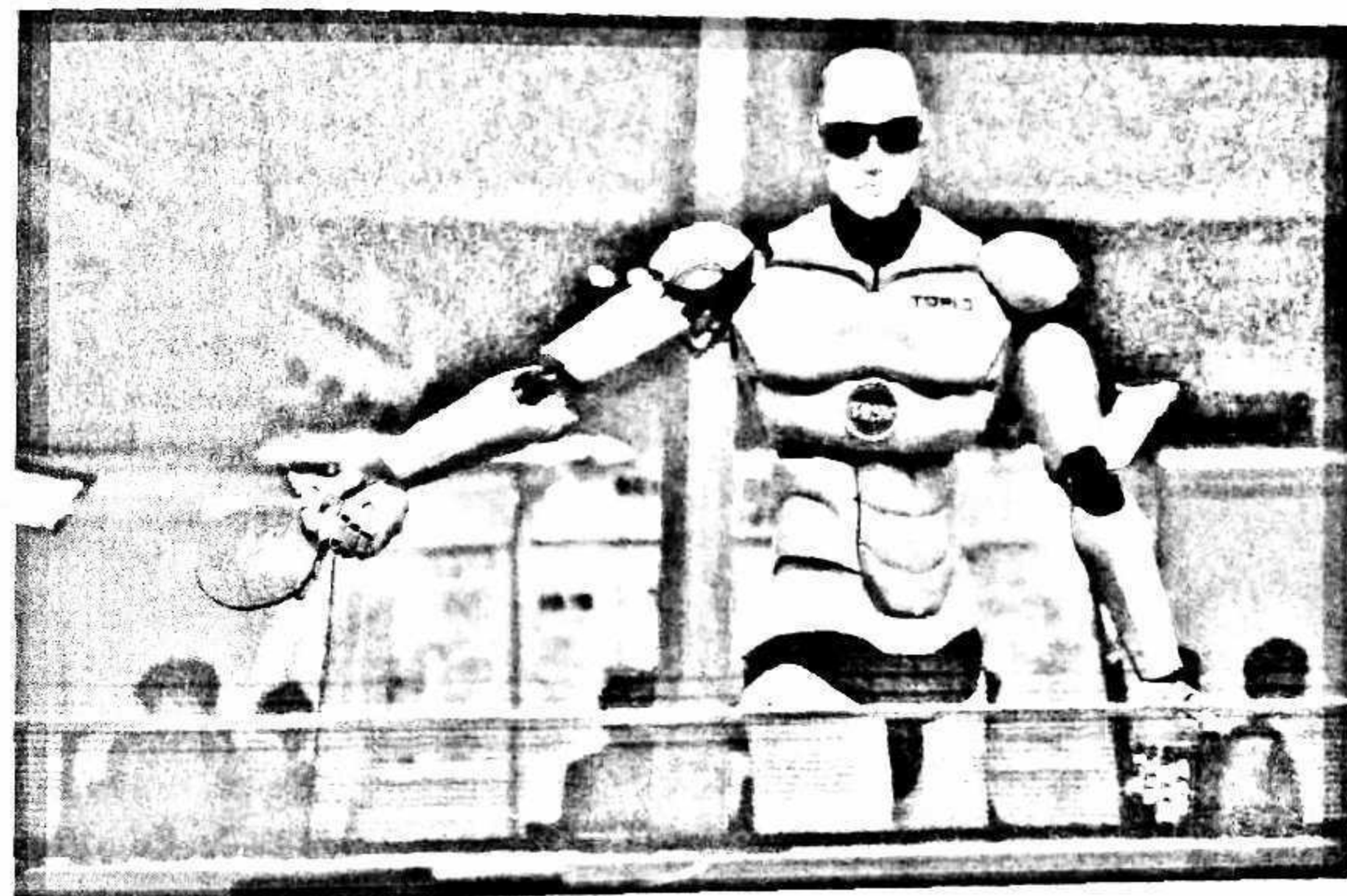
Además de la navegación segura, la interacción con el entorno, el mantenimiento del equilibrio y la ejecución de movimientos con apariencia humana, el desarrollo de los robots humanoides plantea el reto de disponer de una gran capacidad de interpretación de la información obtenida por el sistema de reconocimien-

LA ROBÓTICA INTELIGENTE EN EL OCIO

La robótica en los últimos años ha desarrollado multitud de robots orientados al entretenimiento y al ocio, que ofrecen unas posibilidades complementarias a las habituales imágenes en una pantalla.

De las mascotas virtuales a los campeones deportivos

La primera mascota digital, el Tamagotchi, fue creada por Aki Maita en 1996 y alcanzó una gran popularidad. Más tarde apareció el primer robot perro, que respondía a las voces de su propietario, y desde entonces han aparecido prototipos de distintos animales o muñecos que han ido incorporando mayores capacidades de inteligencia, lo que ha despertado un interés creciente en el desarrollo de estos robots orientados al ocio. También se han creado pequeños robots humanoides de bajo coste destinados al entretenimiento, con capacidad de bailar siguiendo el compás de la música o de realizar determinados juegos, de gran atractivo y aceptación comercial. Una nueva familia de robots de entretenimiento son los desarrollados para competir con el usuario en la práctica de un deporte, como el ping-pong. En la *International Robot Exhibition* de Tokio de 2007 se presentó el primer robot de este tipo. Hoy día ya existen robots con niveles de juego equiparables a los de los campeones mundiales. La robótica inteligente representa, pues, un gran potencial en el campo social, diluyendo la distancia entre un robot asistencial y un robot de compañía, entretenimiento e incluso juego de competición.



El robot TOPIO durante una partida de ping-pong en 2009.

to de voz; de capacidad de planificación para compatibilizar sus objetivos con la información oral interpretada, y también de capacidad de expresarse oralmente de forma coherente.

Dar respuesta a las necesidades que plantea la expansión de la robótica en el entorno de los servicios es el gran desafío que debe afrontar el desarrollo de la inteligencia artificial. En la medida en que la IA dé respuesta a estos problemas, la presencia de robots se incrementará tanto en los entornos domésticos como en los espacios públicos y los entornos urbanos.

La robótica inteligente en el campo de la medicina

La tecnología no ha cesado de aumentar su protagonismo en el entorno médico, tanto en el diagnóstico como en el tratamiento, la cirugía, la rehabilitación y la asistencia.

El diagnóstico es una de las principales áreas de aplicación de la robótica médica. Aunque el avance tecnológico en el diagnóstico suele asociarse a la imagen médica, la robótica también juega —y lo hará en mayor medida en el futuro— un papel de asistencia notable. Por ejemplo, a la hora de realizar una biopsia —la extracción de una muestra biológica del paciente mediante una punción localizada en un punto muy concreto—, la robótica ofrece una precisión que no se puede conseguir de forma manual y permite generar la trayectoria óptima para ajustar el punto teórico seleccionado con la posición real en el paciente sobre la mesa de operaciones, teniendo en cuenta modelos de deformación de los tejidos blandos en función de la posición del paciente.

La endoscopia es una técnica de diagnóstico basada en la introducción de un dispositivo óptico en el organismo para la visualización o la toma de muestras. La inteligencia artificial proporciona una ayuda al personal médico, que puede interpretar el avance del endoscopio y poner en correspondencia la imagen visualizada sobre la anatomía del paciente.

La endoscopia digestiva proporciona imágenes de calidad del esófago, el estómago o el duodeno, pero el abordaje bucal es muy invasivo y provoca malestar e incluso puede causar daños

al paciente. Por esta razón, la robótica ha desarrollado pastillas exploradoras, que llevan incorporada una cámara, leds de iluminación, batería y el sistema de transmisión de las imágenes que van siendo captadas a lo largo del recorrido de la pastilla por el aparato digestivo. Progresivamente se han introducido mayores capacidades de ayuda al diagnóstico, como el telecontrol de la cámara y el *zoom*, o la incorporación de dispensadores de fármacos en localizaciones determinadas. El reto de la robótica y de la inteligencia artificial es el de conseguir una navegación autónoma y una capacidad de posicionado para lograr una focalización orientada a unos objetivos dados.

En el cateterismo —la introducción de microsondas para la exploración o el tratamiento a través del sistema vascular—, el problema que se presenta es el de la navegación del cabezal del catéter durante su avance. Cuando el camino que ha de recorrer es sencillo, el guiado se realiza visualmente mediante un seguimiento radiológico. Cuando el camino es más complicado, como en el caso de un cateterismo cerebral, que implica recorridos complejos a través de ramificaciones secundarias, la inteligencia artificial aporta herramientas para facilitar el guiado y minimizar los riesgos de accidentes cerebrovasculares.

En cuanto a la aplicación de la robótica en cirugía, presenta un claro desfase respecto al desarrollo que ha experimentado en la industria. Ello es debido a que en la industria el entorno puede definirse específicamente para facilitar cada aplicación, mientras que en el campo de la cirugía el entorno es el paciente, que posee una anatomía propia. En este caso, cada operación, a pesar de tener unos procedimientos básicos comunes, debe plantearse de forma específica y adaptada a cada paciente.

Aunque existen cirugías ciertamente rutinarias, otras requieren un alto grado de especialización y destreza. Por ejemplo, una reconstrucción maxilar puede realizarse con tejido óseo del propio paciente extraído de una zona sana, dada la gran capacidad de regeneración ósea. En este caso, pueden cortarse fragmentos de tibia de formas tales que encajen con las necesidades de implantación ósea en la mandíbula dañada. La inteligencia artificial aporta una herramienta auxiliar que permite optimizar

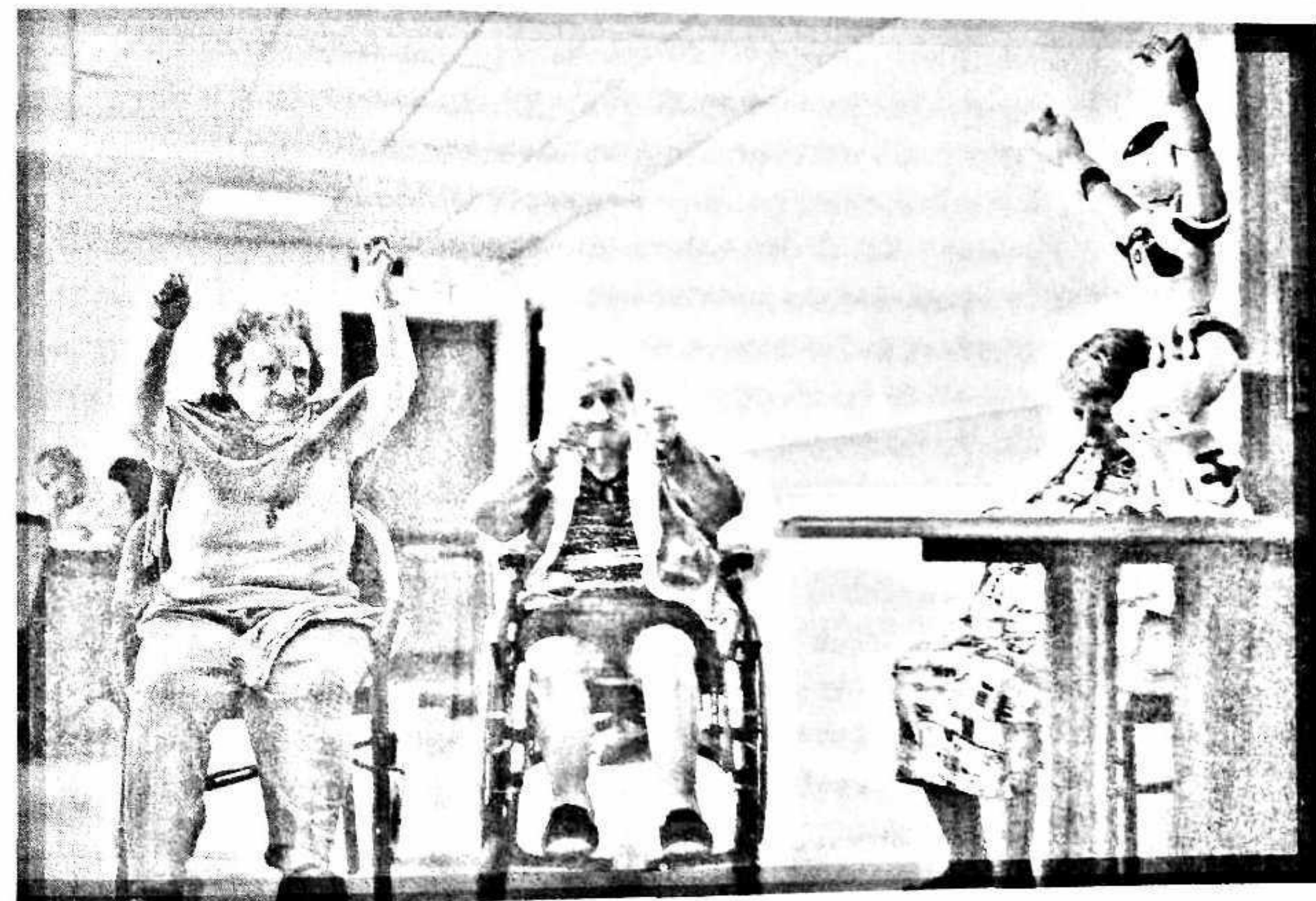
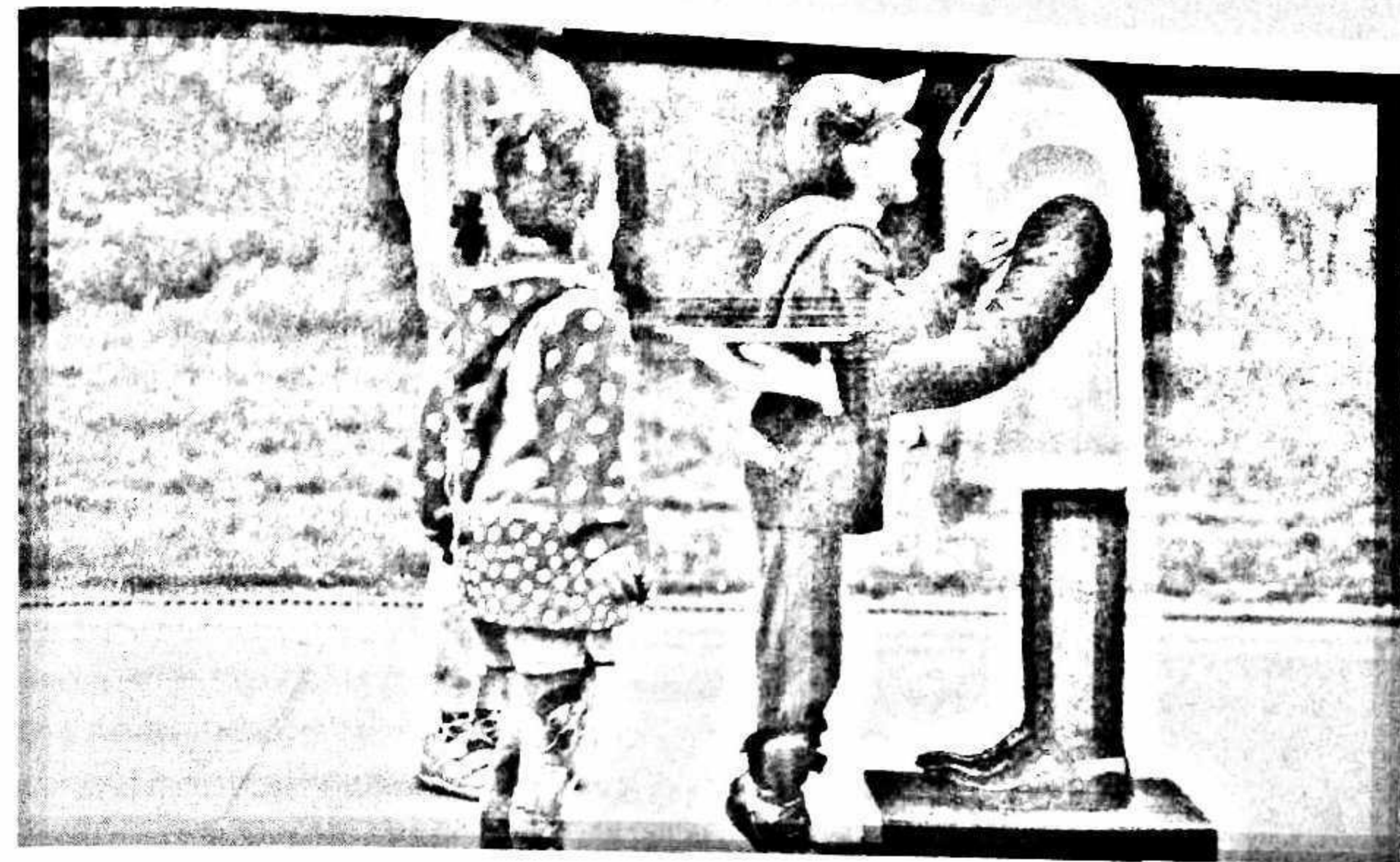
el corte y la extracción robotizada de hueso y garantizar el correcto encaje posterior. En el caso de la reconstrucción facial, el problema no radica solo en el corte e inserción de hueso, sino que también interviene la manipulación de los tejidos blandos, que también afecta al resultado estético final.

Estos ejemplos serán exportables a muchas otras cirugías a medida que la inteligencia artificial permita resolver los múltiples problemas que se presentan.

En el campo de la cirugía mínimamente invasiva, ampliamente desarrollada desde mediados de la década de 1980, el desarrollo de las microcámaras ha permitido la intervención a través de pequeñas incisiones, proporcionando imágenes de calidad de la zona de operación. La laparoscopia es una especialidad de la cirugía mínimamente invasiva desarrollada para operar en las cavidades pélvica y abdominal. La robotización de esta cirugía comenzó a partir del año 2000, aportando mayor precisión y capacidad de operación al poder utilizar instrumentos con más grados de libertad de los que disponen los de la cirugía manual. Esta técnica ha evolucionado para poder operar a través de una única incisión hacia la denominada cirugía laparoscópica de incisión única, que tiene la ventaja de que esta incisión se realiza en el ombligo y su cicatriz no resulta visible. Este avance ha sido posible con el desarrollo de instrumentos más complejos, que en algunos casos limitan los movimientos manuales. La robótica permite compensar estas limitaciones introduciendo grados de libertad adicionales en el instrumento.

El desafío al que se enfrenta la inteligencia artificial en el campo de la cirugía es, por un lado, el desarrollo de actuaciones autónomas para la realización de ciertas tareas repetitivas, como la sutura y, por otro, potenciar el desarrollo de robots autónomos para llevar a cabo las cirugías más estandarizadas y menos complejas pero que requieren resolver problemas como las deformaciones de los tejidos elásticos sometidos a la interacción con los instrumentos quirúrgicos.

Por otra parte, la nanorrobótica ya ofrece dispositivos a escala nanométrica, controlables de forma remota, con capacidad potencial de acceder a cualquier punto de nuestro organismo a



Arriba, el robot Reiner, que recoge basura en las calles de Berlín. En la imagen inferior, una residencia de ancianos francesa en la que se utiliza un robot en las sesiones de gimnasia.

través de la circulación sanguínea. Su futura aplicación está su-
peditada a disponer de la inteligencia artificial necesaria para
controlar estos nanorrobots que fluyen conjuntamente con las
células sanguíneas, los componentes extracelulares y el plasma.

Además del diagnóstico y la cirugía, existe otro campo rela-
cionado con la salud en el que la presencia de robots inteligentes
va en aumento: el de la rehabilitación y la asistencia. El progresi-
vo envejecimiento de la población, así como las discapacidades
que limitan la autonomía personal, provocan una creciente de-
manda de ayuda asistencial. Algunas de estas ayudas conllevan
importantes esfuerzos físicos, como el que implica mover a los
pacientes o realizar ejercicios en terapias rehabilitadoras. En es-
tos casos la robótica constituye una ayuda al asistente, que pres-
ta igualmente sus servicios pero que dispone de una herramienta
que le evita el trabajo físico que conllevan. El cuidador controla
gestualmente el robot, que es el que efectúa el esfuerzo físico
necesario para levantar y trasladar el paciente.

Por otra parte, un robot también puede solucionar a una per-
sona con deficiencias motoras la incapacidad de acceder a los
elementos del entorno y convertirse en un ayudante cotidiano,
dócil e infatigable.

El desarrollo de los robots sociales no ha surgido únicamente
por la necesidad de aportar ayuda física al usuario, sino también
cuando resulta necesario un apoyo anímico. Estos robots están
demostrando su efectividad para mitigar la soledad y el aburri-
miento, constituyendo un elemento positivo en terapias de esti-
mulación cognitiva (véase la imagen inferior de la página 145).

EL IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DE LA ROBÓTICA

A comienzos del siglo XXI, nos hallamos inmersos en la Cuarta
Revolución Industrial, impulsada por el actual desarrollo tecno-
lógico, que comporta significativas innovaciones. Las principa-
les aportaciones a este nuevo salto tecnológico son: la irrupción
del internet de las cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*) y la
integración de las comunicaciones; la informática integrada en

dispositivos, en equipos o en sensores (*embedded*); la sensori-
zación masiva; los nuevos materiales, y la fabricación en línea
(mediante la impresión 3D o fabricación aditiva). Todo ello ha
dado lugar a la denominada industria 4.0.

En esta nueva revolución, la robótica ya no es un elemento
distintivo, aunque sigue siendo un recurso esencial, tanto desde
el punto de vista estratégico como desde el socioeconómico.

La robótica y la automatización plantean grandes retos en
dos aspectos básicos, el tecnológico y el social. En lo que se re-
fiere al aspecto tecnológico, para que la robótica siga amplian-
do su ámbito de actuación, su evolución está su-
peditada al desarrollo de las tecnologías que más condicionan su desarrollo,
que son la inteligencia artificial, la microelectrónica y los nue-
vos materiales.

La implantación de la robótica en todo tipo de entornos exi-
ge desarrollar sistemas más autónomos y con mayor capacidad
de decisión. Ello hace imprescindible un mayor progreso en la
inteligencia artificial, para dotar al robot de mayor capacidad
de planificar, de aprender y de interaccionar de forma natural
e intuitiva con las personas. De esta manera, la robótica podrá
conseguir comportamientos más inteligentes y alcanzar retos to-
davía no asumibles.

Estos comportamientos más inteligentes también exigen nue-
vos avances en microelectrónica, especialmente para desarro-
llar y perfeccionar sistemas de percepción, entre los que tiene
especial relevancia la visión por computador. Por otra parte, la
microelectrónica facilita la miniaturización en todo tipo de equi-
pos y la integración de sistemas de control más inteligentes en
sus correspondientes dispositivos periféricos, potenciando la in-
teligencia distribuida. Esta creciente miniaturización ha permiti-
do dar unos primeros pasos en el desarrollo de la nanorrobótica,
que llevará a nuevos retos en muchas y muy diversas áreas.

El amplio campo de aplicación de la robótica precisa desarro-
llar nuevos materiales, que en algunos casos deberán ser más li-
geros, o más resistentes, o mejor adaptables al entorno, además
de resolver problemas como la biocompatibilidad o la resisten-
cia a la esterilización. Otro factor de gran incidencia en varios

campos de la robótica es la necesidad de disponer de baterías de mayor capacidad y menor tamaño y peso.

En lo que se refiere a los aspectos sociales, en particular a la incorporación de la robótica en los entornos domésticos, el coste será un factor relevante, pero se prevé una implantación creciente como consecuencia de estos avances tecnológicos, que conllevará mayores escalas de producción y costes más competitivos. Otro aspecto que puede limitar el crecimiento de la robótica para usos más cotidianos es tanto su aspecto externo como la capacidad y facilidad de interacción con el usuario. Eso implica el desarrollo de diseños más atractivos, funcionales y eficaces, aspectos que no se resuelven necesariamente con diseños guiados por la moda o el impacto mediático.

Sin embargo, lo que más preocupa a la sociedad es la visión de la robótica como una potencial amenaza. En este sentido no faltan voces autorizadas de mirada alarmista, que pronostican en un horizonte no muy lejano un importante aumento del paro debido a esta imparable escalada en la robotización y automatización de los procesos de producción. Según esta visión, esto llevaría aparejada una polarización entre puestos de trabajo basados en altos niveles de formación y de especialización, con salarios elevados, y puestos de trabajo sin requerimientos formativos, que resultarán más precarios y con una remuneración mucho menor.

Por otra parte, también hay quienes alertan sobre los riesgos que comporta la robótica inteligente, presuponiendo a los robots una capacidad de actuación autónoma que pueda llegar a estar fuera del control humano.

En lo que se refiere a la incidencia de la robotización sobre el desempleo, existen documentados estudios que estiman que la introducción de un robot en un proceso industrial supone la destrucción de entre cinco y seis puestos de trabajo. En un escenario de crecimiento de los 1,5 millones de robots actuales a los seis millones previstos en 2025, y de una creciente aplicación de la inteligencia artificial, algunos economistas vaticinan que se perderán entre el 45% y el 60% de los actuales puestos de trabajo en el sector industrial.

Para paliar los efectos de la robotización sobre el desempleo se han propuesto dos alternativas: la de crear una renta básica —ya sea universal o con condiciones— y la de imponer una tasa o un impuesto a los robots. En ambos casos el objetivo es conseguir una distribución de la riqueza que la industria seguirá produciendo pero con mucha menos mano de obra.

Frente a la realidad de que la robotización desplaza mano de obra, se constata que eso no se traduce siempre en un aumento del desempleo. Países con una relación robots/trabajadores más elevada, como Japón o Corea, son precisamente los que hoy día tienen unas tasas de paro menores. Ello podría deberse a que la eclosión de la Tercera Revolución Industrial —de la que estos países líderes en implantación de la robótica son un paradigma— ha supuesto una mayor competitividad y una mayor capacidad de producción de bienes y equipos. Este proceso de automatización y robotización ha requerido, por una parte, incorporar personal técnico cualificado con retribuciones más elevadas.

Por otra parte, el aumento de la capacidad de producción ha comportado también un crecimiento de la actividad económica, lo que conlleva una mayor demanda de ocupación en otros sectores, especialmente el sector servicios. Pero es muy probable que en este proceso la mano de obra desplazada de la industria no sea la misma que se incorpore a otros sectores, produciéndose bolsas de marginalidad dentro de un contexto de progreso.

El decrecimiento de la mano de obra del sector industrial está provocado en parte por la evolución tecnológica, pero también por la crisis económica. No parece, pues, que la Cuarta Revolución Industrial tenga por el momento una gran incidencia en la tasa de desempleo en el sector industrial, que ya representa un porcentaje muy reducido sobre la estructura del empleo por sectores económicos. Debido principalmente a las dificultades tecnológicas, parece aún muy lejana la implantación masiva de la robótica en el sector de los servicios de forma que afecte sensiblemente al empleo. Actualmente es más factible y útil que la robótica coopere con personal especializado para potenciar o facilitar la ejecución de determinadas tareas, que el desarrollo de robots autónomos capaces de realizarlas de forma eficaz.

Por otra parte, el desarrollo tecnológico está produciendo una notable reducción de costes de muchos componentes y permite disponer de potentes procesadores y aplicaciones para facilitar su usabilidad. Ello facilita poder ubicarlos tanto en equipos como en dispositivos de su entorno (*embedded systems*), favoreciendo la implantación de estrategias de control con inteligencia distribuida. Estos subsistemas pueden complementar su inteligencia distribuida al estar interconectados entre sí a través de redes de comunicación. Todo ello lleva a poder disponer de gran cantidad de información, el concepto de *big data*, que debidamente procesada permite generar conocimiento y proporcionar servicios muy diversos, tanto para aplicaciones industriales como para potenciar o generar servicios. Actualmente, disponiendo solo de un ordenador dotado de potentes y asequibles herramientas de diseño y de las ya populares impresoras 3D, es posible fabricar prototipos por complejos que sean. Estas impresoras 3D operan por fabricación aditiva, posicionando un cabezal que va depositando un material plástico punto a punto en el espacio hasta conformar capa a capa la pieza diseñada. Hoy en día operan con una limitada gama de materiales pero se prevé que en pocos años podrán hacerlo con cualquier metal, aumentando considerablemente sus aplicaciones. Las posibilidades que estas tecnologías ofrecen permitirán generar muchas oportunidades empresariales en cascada y, en muchos casos, con unos costes de inversión mínimos. Las nuevas tecnologías potencian el factor humano y su creatividad, constituyendo el valor más relevante y detonante para la creación de nuevas empresas más especializadas.

Todo ello tiende a aumentar, por una parte, la capacidad de generación de riqueza más atomizada y, por otra, la posibilidad de prestar más y mejores servicios a la industria y a la sociedad. Sin embargo, todas estas consideraciones no deberían dejar de lado los potenciales efectos secundarios del avance tecnológico. Las sucesivas revoluciones industriales han producido en los países industrializados un aumento de la renta per cápita y de la calidad de vida, pero también han provocado fuertes tensiones sociales, especialmente derivadas de la desigual distribución de la riqueza

generada. La capacidad de creación de riqueza no garantiza su distribución más equilibrada.

En la actualidad se está produciendo un creciente distanciamiento entre las rentas disponibles de los países industrializados y de los países en vías de desarrollo, y entre las rentas más altas y las más bajas dentro de un mismo país. También existen fuertes desequilibrios entre pequeñas y grandes empresas en la tributación sobre ganancias, que dificultan el poder revertir a la sociedad los beneficios conseguidos con la mayor productividad derivada de la automatización y la robótica, dado que las grandes empresas y multinacionales pueden hacer uso de una ingeniería financiera para reducir su tributación.

La historia muestra que cada nuevo avance tecnológico ha supuesto una mejora de la calidad de vida a escala global, pero también ha representado en muchos casos un factor generador de mayor desigualdad y, en ocasiones, su uso inadecuado ha constituido una amenaza para el medioambiente.

Las oportunidades que ofrece el desarrollo de las tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial pueden suministrar los medios para afrontar el reto de conseguir una distribución más equitativa de la riqueza y una mayor capacidad de control del uso de unas tecnologías que, por su potencial, tienen efectos globales sobre el planeta.

LECTURAS RECOMENDADAS

////////////////////////////////////

- ASIMOV, I., *Yo, robot*, Barcelona, Edhasa, 1950.
- AMAT, J., BASAÑEZ, L., FERRATÉ, G. ET AL., *Robótica industrial*, Barcelona, Marcombo Boixareu Editores, 1986.
- ARACIL, R., BARRIENTOS, A., PEÑÍN, L.F. Y BALAGUER, C., *Fundamentos de robótica*, Madrid, McGraw-Hill, 2007.
- ARACIL, R., GIL, P., POMARES, J. ET AL., *Robots y sistemas sensoriales*, Madrid, Prentice Hall España, 2002.
- FULLER, J.L., *Robotics: Introduction, Programming and Projects*, Nueva Jersey, Prentice Hall, 1999.
- OLLERO, A., *Robótica. Manipuladores y robots móviles*, Barcelona, Marcombo, 2001.
- VV.AA. (ED. SICILIANO, A. Y KHATIB, O.), *Handbook of Robotics*, Berlín, Springer, 2015.
- VV.AA., *Libro blanco de la robótica. De la investigación al desarrollo tecnológico y futuras aplicaciones*, CEA, Comité Español de Robótica, 2007.

ÍNDICE

- accesibilidad 46, 49-51
- acomodación
 - activa 102, 103
 - pasiva 102, 103
- actuadores 44, 47, 53, 55-58, 61, 63, 67, 68, 79, 105, 121-123, 127
- AGV 70, 73
- anillo
 - abierto 18, 20
 - cerrado 18, 20
- aprendizaje 23, 78, 79, 132, 134-138
- arquitecturas clásicas 51, 52, 57
- autómatas 15-17
 - programables 32, 39, 40
- AUV (robots submarinos autónomos) 129
- base de sustentación 123
- biestable 37
- big data* 74, 150
- bit 25
- CAD 76
- cadena cinemática 55, 56
- capacidad de carga 48, 90, 95
- cápsula
 - Huygens 92
 - Philae 92
- cáster 123
- cateterismo 143
- chip 30
- cibernética 23
- circuito integrado 29-32
- consigna 18, 20-22, 24, 69, 125
- decisión 132-134, 137
- dron 90, 91, 110, 112, 131
- elemento terminal 45-51, 53, 55, 57, 60, 61, 66, 67, 69, 72, 77-79, 94, 96, 102, 103, 114, 115
- embedded systems* 147, 150

error

- de posicionado 47, 56, 68, 71, 102, 128
- de repetitividad 47
- en sistemas de control 20-23

ESA 92

espacio

- cartesiano 48, 49, 66, 67, 77, 78
- de configuraciones 66, 67

estabilidad

- de un sistema de control 20, 21, 23, 29
- mecánica 64, 105, 123, 124, 127
- estructura mecánica 44, 47, 51, 61, 71

factor

- derivativo 22
- integral 22
- proporcional 22
- feedback 20, 23, 24
- filoguiado 70
- función
 - lógica 35-38
 - memoria 35-39

- geometría Ackermann 124, 125
- germanio 26, 27, 29

- giro 49-51, 56, 62, 68, 74, 104, 121-125, 127, 129, 131

- GPS 9, 106, 109, 128, 129, 133
- grado de libertad 46, 47, 50, 53, 55, 62, 103, 104, 127

- hiperdeterminación 57
- holonómico 122, 123

- impresora 3D 107, 147, 150
- impurezas (trivalentes y pentavalentes) 27, 28
- industria 4.0 147

- integración multisensorial 70
- inteligencia artificial 10, 132, 133, 137, 139, 140, 142-144, 146-148
- interfaz de usuario 45, 62
- internet de las cosas 146

laparoscopia 144

- mecanismo diferencial 125
- microelectrónica 10, 23, 26, 29, 116, 147

nanorrobótica 44, 144, 146, 147

- oblea 30, 31
- odometría 71, 128

- partición 136, 137
- percepción 63, 68-70, 72, 119, 120, 132-135, 140, 147
- PID 21, 22
- planificación 71, 76, 132, 137, 139, 140, 142
- planificador 75-77, 138-140
- plataforma Stewart 57-59
- precisión 21, 44, 45, 47, 48, 53, 54, 61, 71, 96-100, 102, 106, 107, 109, 128, 132, 134, 142, 144
- procesador 10, 30, 32, 40, 62, 68, 78, 131, 150
- proceso fotolitográfico 31
- programación 16, 39, 40, 67, 69, 71, 72, 75, 77, 78, 97, 102, 114, 136
- en línea 78
- fuera de línea 79
- por demostración 79
- por guiado 77-79
- textual 77, 79
- razonamiento 132-134

- realimentación 19, 20, 23, 24, 36
- redundancia 46, 49, 75, 50, 62, 79
- regulador de Watt 16, 19
- repetitividad 45, 47, 95
- robot

- aéreo 44, 90, 130, 131
- asistencial 61, 141, 142, 146
- autónomo 44, 109, 129, 130, 144, 149
- con patas 64, 127
- con ruedas 47, 63, 64, 70, 92, 120-126, 128
- de compañía 141, 146
- de coordenadas angulares 52, 54, 68, 127
- de coordenadas cartesianas 48, 49, 51, 52, 99
- de coordenadas cilíndricas 51, 52, 54, 99, 101
- de coordenadas polares 51, 52, 54
- Delta 57-59
- hexápodo 64, 127
- humanoide 55, 61-63, 79, 89, 127, 140, 141
- movido por cables 59-61
- paralelo 55, 56
- redundante 50, 62, 79
- SCARA 53
- Sojourner 92
- submarino 44, 65, 68, 85, 87, 89, 129, 133
- teleoperado 43, 107, 129, 130, 132
- Unimate 84
- Rosetta 92
- ROV 129
- ruedas de rodillos 126, 128
- semiconductor 26-28, 32, 33
- sensores 20, 22-24, 35, 36, 39, 45,

- 47, 63, 69-72, 74, 78, 84, 90, 92, 93, 97, 102, 105, 113, 116, 128-131, 133, 140, 147

- servocontrolador 68, 70, 125
- silicio 26-30, 33

sistemas

- analógicos 24
- de coordenadas 46, 48
- digitales 24-26
- lógicos 32, 34, 35, 39, 40
- multirrobot 75, 140
- secuenciales 32, 38-40

SLAM 140

sonda Cassini 93

teleoperación 71, 119

- teoría de control 10, 16, 18, 21, 23, 24

tiempo de muestreo 88

tipo N (material) 27, 30, 33

tipo P (material) 27, 30, 33

tolerancia a fallos 75

- toma de decisiones 119, 130, 134, 138, 139

transformación cinemática

- directa 67
- inversa 67, 68

transistor 26, 29-32

MOS 33

trompa de elefante 54

tuneladora 108, 111

UAV 90, 131

- unidad de control 45, 57, 63, 68, 69, 77-79, 102, 103

unión PN 27, 28

válvula de vacío 26

variables articulares 67, 68

vehículo autónomo 70

volumen de trabajo 49, 50, 95